



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

**EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DE 5-HIDROXIMETILFURFURAL EXTRAÍDO DE
LA MIEL DE TERCERA DEL PROCESO DE AZÚCAR Y DEL DESPERDICIO DE
CAFÉ CEREZA A NIVEL LABORATORIO, PARA SU USO COMO PRECURSOR
DEL BIOCOMBUSTIBLE 2,5 DIMETILFURANO SUSTITUTO DEL DIÉSEL 2-D**

Jader Federico Yanfranco Villagrán Boror

Asesorado por el Ing. Jorge Emilio Godínez Lemus

Guatemala, marzo de 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DE 5-HIDROXIMETILFURFURAL EXTRAÍDO DE LA MIEL DE TERCERA DEL PROCESO DE AZÚCAR Y DEL DESPERDICIO DE CAFÉ CEREZA A NIVEL LABORATORIO, PARA SU USO COMO PRECURSOR DEL BIOCOMBUSTIBLE 2,5 DIMETILFURANO SUSTITUTO DEL DIÉSEL 2-D

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

JADER FEDERICO YANFRANCO VILLAGRÁN BOROR
ASESORADO POR EL ING. JORGE EMILIO GODÍNEZ LEMUS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, MARZO DE 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Narda Lucía Pacay Barrientos
VOCAL V	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADORA	Inga. Hilda Piedad Palma Ramos
EXAMINADOR	Ing. Williams Guillermo Álvarez Mejía
EXAMINADOR	Ing. Mario José Mérida Meré
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DE 5-HIDROXIMETILFURFURAL EXTRAÍDO DE LA MIEL DE TERCERA DEL PROCESO DE AZÚCAR Y DEL DESPERDICIO DE CAFÉ CEREZA A NIVEL LABORATORIO, PARA SU USO COMO PRECURSOR DEL BIOCOMBUSTIBLE 2,5 DIMETILFURANO SUSTITUTO DEL DIÉSEL 2-D

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 13 de febrero de 2013.

Jader Federico Yanfranco Villagrán Boror



Guatemala, 12 de agosto de 2014
Ref. EIQ.TG-IF.025.2014

Ingeniero
Víctor Manuel Monzón Valdez
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Monzón:

Como consta en el registro de evaluación del informe final EIQ-PRO-REG-007 correlativo **006-2013** le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADUACIÓN

Solicitado por el estudiante universitario: **Jader Federico Yanfranco Villagrán Boror**.
Identificado con número de carné: **2008-19154**.
Previo a optar al título de **INGENIERO QUÍMICO**.

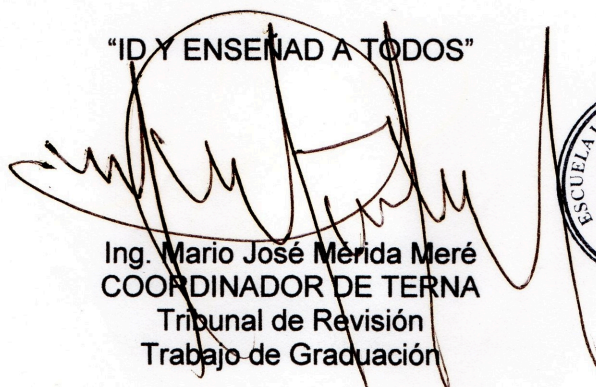
Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DE 5-HIDROXIMETILFURFURAL EXTRAÍDO DE LA MIEL DE TERCERA DEL PROCESO DE AZÚCAR Y DEL DESPERDICIO DE CAFÉ CEREZA A NIVEL LABORATORIO PARA SU USO COMO PRECURSOR DEL BIOCOMBUSTIBLE 2,5 DIMETILFURANO SUSTITUTO DEL DIÉSEL 2-D

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por el Ingeniero Químico: **Jorge Emilio Godínez Lemus**.

Habiendo encontrado el referido informe final del trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"


Ing. Mario José Mérida Meré
COORDINADOR DE TERNA
Tribunal de Revisión
Trabajo de Graduación



C.c.: archivo



Guatemala 12 de Agosto de 2014

Ingeniero

Víctor Manuel Monzón Valdez

Director de Escuela de Ingeniería Química

Facultad de Ingeniería

Universidad de San Carlos de Guatemala

Estimado Ing. Víctor Monzón:

Atentamente me dirijo a usted, para notificarle que ha sido concluido satisfactoriamente el Informe Final del Trabajo de Graduación del estudiante Jader Federico Yanfranco Villagrán Boror, estudiante de la carrera de Ingeniería Química, quien se identifica con carnet número 2008-19154, titulado: **"EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DE 5-HIDROXIMETILFURFURAL EXTRAÍDO DE LA MIEL DE TERCERA DEL PROCESO DE AZÚCAR Y DEL DESPERDICIO DE CAFÉ CEREZA A NIVEL LABORATORIO PARA SU USO COMO PRECURSOR DEL BIOCOMBUSTIBLE 2,5 DIMETILFURANO SUSTITUTO DEL DIÉSEL 2-D"**.

Me permito informarle que después de haber realizado las revisiones del respectivo informe y haber hecho las correcciones pertinentes, considero que llena los requisitos para su aprobación.

Sin otro particular, quedo a su entera disposición, respetuosamente

Ing. Qco. Jorge Emilio Godínez Lemus

Asesor

Colegiado No. 874

Ing. Jorge Emilio Godínez Lemus
INGENIERO QUÍMICO
Colegiado 874



Guatemala, 12 de agosto de 2014
Ref. EIQ.TG.148.2014

Señores
Área de Lingüística
Facultad de Ingeniería
Presente,

Estimados Señores

Como consta en el registro de evaluación del informe final EIQ-PRO-REG-007 correlativo **006-2013** le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADUACIÓN

Solicitado por el estudiante universitario: **Jader Federico Yanfranco Villagrán Boror**.
Identificado con número de carné: **2008-19154**.
Previo a optar al título de **INGENIERO QUÍMICO**.

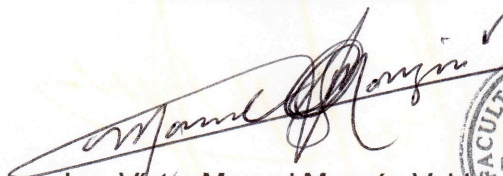
Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

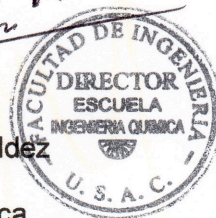
EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DE 5-HIDROXIMETILFURFURAL EXTRAÍDO DE LA MIEL DE TERCERA DEL PROCESO DE AZÚCAR Y DEL DESPERDICIO DE CAFÉ CEREZA A NIVEL LABORATORIO PARA SU USO COMO PRECURSOR DEL BIOCOMBUSTIBLE 2,5 DIMETILFURANO SUSTITUTO DEL DIÉSEL 2-D

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por el Ingeniero Químico: **Jorge Emilio Godínez Lemus**.

Habiendo encontrado el referido informe final del trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"


Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química



C.c.: archivo



Facultad de Ingeniería
Unidad de Lingüística

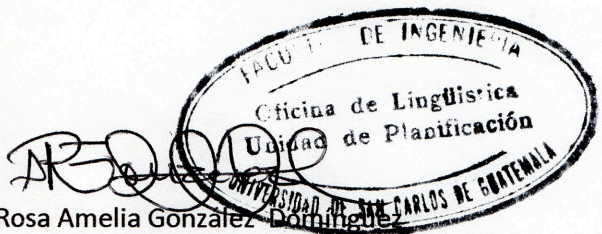
Guatemala, 25 de septiembre de 2014
Ling.30/14

Ingeniero Víctor Manuel Monzón Valdez
Director de la Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería, USAC

Señor director:

Por este medio hago de su conocimiento que la Unidad de Lingüística hace una modificación al título del trabajo de graduación del estudiante **Jader Federico Yanfranco Villagrán Boror**, con número de carné: **2008-19154** el cual fue aprobado de acuerdo al protocolo como: **EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DE 5-HIDROXIMETILFURFURAL EXTRAÍDO DE LA MIEL DE TERCERA DEL PROCESO DE AZÚCAR Y DEL DESPERDICIO DE CAFÉ CEREZA A NIVEL LABORATORIO PARA SU USO COMO PRECURSOR DEL BIOCOMBUSTIBLE 2,5 DIMETILFURANO SUSTITUTO DEL DIÉSEL 2-D.**

La Unidad modifica el título del trabajo en virtud de que el mismo no está bien redactado y propone la siguiente forma: **EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DE 5-HIDROXIMETILFURFURAL EXTRAÍDO DE LA MIEL DE TERCERA DEL PROCESO DE AZÚCAR Y DEL DESPERDICIO DE CAFÉ CEREZA A NIVEL LABORATORIO, PARA SU USO COMO PRECURSOR DEL BIOCOMBUSTIBLE 2,5 DIMETILFURANO SUSTITUTO DEL DIÉSEL 2-D.**



Licenciada Rosa Amelia González Domínguez
Coordinadora de la Unidad de Lingüística



Ref.EIQ.TG.196.2014

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Trabajo de Graduación del estudiante, **JADER FEDERICO YANFRANCO VILLAGRÁN BOROR** titulado: "**EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DE 5-HIDROXIMETILFURFURAL EXTRAÍDO DE LA MIEL DE TERCERA DEL PROCESO DE AZÚCAR Y DEL DESPERDICIO DE CAFÉ CEREZA A NIVEL LABORATORIO, PARA SU USO COMO PRECURSOR DE BIOCOMBUSTIBLE 2,5 DIMETILFURANO SUSTITUTO DEL DIÉSEL 2-D**". Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.


Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química



Guatemala, septiembre 2014

Cc: Archivo
VMMV/ale



Facultad de Ingeniería
Decanato

DTG. 536.2014

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al Trabajo de Graduación titulado: **EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DE 5-HIDROXIMETILFURFURAL EXTRAÍDO DE LA MIEL DE TERCERA DEL PROCESO DE AZÚCAR Y DEL DESPERDICIO DE CAFÉ CEREZA A NIVEL LABORATORIO, PARA SU USO COMO PRECURSOR DEL BIOCOMBUSTIBLE 2,5 DIMETILFURANO SUSTITUTO DEL DIÉSEL 2-D**, presentado por el estudiante universitario **Jader Federico Yanfranco Villagrán Boror**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Ing. Murphy Olimpo Paiz Recinos
Decano

Guatemala, 9 de octubre de 2014

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Ser Todopoderoso que me ha guiado a lo largo de este camino y por ser el centro de mi vida, porque me dio fuerza y aliento en todo momento.
Mis padres	Federico Villagrán y Vilma Boror, por ser mis modelos de vida, perseverancia, amor, responsabilidad, por ser los pilares donde me sostengo, por amarme tanto y darme el mejor ejemplo. Este logro es nuestro, los quiero mucho.
Mis hermanas	Katherine Samantha y Stephanie Sarai Villagrán Boror, por compartir los buenos y malos momentos. Su cariño y apoyo es invaluable. Las quiero mucho.
Mis primos y primas	A cada uno por los recuerdos compartidos.
Mis amigos y amigas	Gracias por la amistad incondicional a lo largo de la carrera, la vida y el futuro con el cual nos depararán muchas más experiencias.
Los ingenieros	Mil gracias por sus enseñanzas, por confiar en mí y por darme las herramientas para lograr el éxito.

AGRADECIMIENTOS A:

Dios	Mi señor, por darme tu salvación, vida, inteligencia y fuerza para alcanzar esta meta.
Mis padres	Federico Villagrán y Vilma Boror, por brindarme todo su amor y comprensión incondicionalmente.
Mis hermanas	Katherine y Stephanie Villagrán Boror, por todas las experiencias que pasamos y que pasaremos a lo largo del camino de la vida.
Ing. Jorge Godínez	Por creer en mí, por ayudarme, guiarme y darme muchas herramientas a lo largo de este proyecto, gracias por ser un maestro y un amigo.
Laboratorio de Físicoquímica, USAC	Gracias por todo el apoyo brindado para llevar a cabo este proyecto.
Escuela de Ingeniería Química	Por permitirme formarme brindándome habilidades y técnicas, amistades e inolvidables experiencias.
Facultad de Ingeniería	Gracias por formarme en mi carrera profesional.
Universidad de San Carlos de Guatemala	Te llevaré por siempre en el corazón.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS.....	IX
GLOSARIO.....	XI
RESUMEN.....	XVII
OBJETIVOS	XIX
Hipótesis.....	XX
INTRODUCCIÓN.....	XXI
1. ANTECEDENTES	1
2. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1. Combustibles.....	5
2.1.1. Biocombustibles.....	5
2.1.1.1. Clasificación de biocombustibles.....	7
2.1.1.2. Biodiésel	7
2.1.1.3. Bioetanol	9
2.1.1.4. 2,5 dimetilfurano (DMF).....	11
2.1.2. Protocolo de Kioto.....	16
2.1.3. Criterios para determinar la eficiencia de un combustible.....	16
2.1.3.1. Potencia calorífica	16
2.1.3.2. Volatilidad	17
2.1.3.3. Estabilidad en almacenamiento.....	17
2.1.3.4. Seguridad.....	18

2.1.4.	Combustible diésel	18
2.1.4.1.	Calidad del diésel	19
2.2.	Glúcidos, carbohidratos, hidratos de carbono o sacáridos	21
2.2.1.	Monosacáridos	22
2.2.2.	Disacáridos.....	24
2.2.2.1.	Sacarosa	24
2.2.2.1.1.	Hexosas.....	25
2.2.2.1.2.	Fructosa.....	26
2.2.3.	Reacción de Seliwanoff	26
2.2.4.	5-Hidroximetilfurfural	27
2.3.	Caña de azúcar.....	28
2.3.1.	Variedades de caña de azúcar	28
2.3.2.	Proceso de fabricación de azúcar.....	28
2.3.3.	Miel de tercera.....	30
2.4.	Café	30
2.5.	Norma ASTM D 975-12.....	31
2.6.	Escalamiento.....	32
2.6.1.	Principio de semejanza.....	34
3.	DISEÑO METODOLÓGICO.....	37
3.1.	Variables	37
3.2.	Delimitación de campo de estudio.....	37
3.3.	Recursos humanos disponibles.....	38
3.4.	Recursos materiales disponibles.....	38
3.5.	Técnica cuantitativa.....	39
3.6.	Recolección y ordenamiento de la información	40
3.6.1.	Deshidratación ácida	40
3.6.2.	Diagramas experimentales de procedimiento	42

3.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información	45
3.7.1.	Hojas de tabulación de datos	45
3.8.	Análisis estadístico	45
3.8.1.	Diseño experimental	46
3.8.2.	Análisis de hipótesis	49
4.	RESULTADOS	51
5.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	59
	CONCLUSIONES	65
	RECOMENDACIONES	67
	BIBLIOGRAFÍA	69
	APÉNDICE	73

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Estructura química del etanol	10
2.	Estructura química del 2,5 dimetilfurano	12
3.	Estructura química de la sacarosa	25
4.	Estructura química de la fructosa	26
5.	Estructura química del 5-hidroximetilfurfural.....	28
6.	Diagrama de flujo del proceso de transformación del azúcar	29
7.	Compuestos relevantes en la pulpa de café.....	30
8.	Composición química del mucílago del café.....	31
9.	Tipos de modelos de escalamiento	34
10.	Diagrama experimental para los objetivos 1, 2 y 3	43
11.	Diagrama experimental para el objetivo 4 y 5.....	44

TABLAS

I.	Ventajas y desventajas del biodiésel	9
II.	Ventajas y desventajas del bioetanol.....	11
III.	Propiedades fisicoquímicas del DMF	13
IV.	Comparación entre DMF-etanol-gasolina-diésel.....	14
V.	Información de seguridad del 2,5 dimetilfurano	15
VI.	Ventajas y desventajas del diésel.....	20
VII.	Propiedades y métodos de prueba del diésel	21
VIII.	Variables experimentales	37
IX.	Tabla para datos de la deshidratación ácida.....	45

X.	Arreglo rectangular para tratamientos con tres réplicas.....	46
XI.	Sumatoria de $T\theta J$ para el rendimiento de la extracción de 5-hidroximetilfurfural.....	47
XII.	Análisis de varianza para 2 factores	48
XIII.	Rendimientos máximos de deshidratación para la miel de tercera del proceso de azúcar.	51
XIV.	Condiciones para la deshidratación para obtener un máximo rendimiento para la miel de tercera del proceso de azúcar.....	51
XV.	Rendimientos máximos de deshidratación para la miel del café.....	52
XVI.	Condiciones para la deshidratación para obtener un máximo rendimiento para la miel del café.....	52
XVII.	Rendimiento de deshidratación para el grupo de muestras provenientes de la miel de tercera del proceso de azúcar con relación solvente: mezcla igual a 1:2.....	52
XVIII.	Rendimientos de deshidratación para el grupo de muestras provenientes de la miel de tercera del proceso de azúcar con relación solvente: mezcla igual a 1:1.....	53
XIX.	Rendimientos de deshidratación para el grupo de muestras provenientes de la miel de tercera del proceso de azúcar con relación solvente: mezcla igual a 2:1.....	53
XX.	Rendimientos de deshidratación para el grupo de muestras provenientes de la miel de tercera del proceso de azúcar con variación de tiempo y solvente, basados en las condiciones de la tabla XXXVI.....	54
XXI.	Rendimientos de deshidratación para el grupo de muestras provenientes de la del café con relación solvente: mezcla igual a 1:2.....	54

XXII.	Rendimientos de deshidratación para el grupo de muestras provenientes de la del café con relación solvente: mezcla igual a 1:1.....	55
XXIII.	Rendimientos de deshidratación para el grupo de muestras provenientes de la del café con relación solvente: mezcla igual a 2:1.....	55
XXIV.	Variables de proceso a nivel laboratorio escaladas a nivel planta piloto.....	56
XXV.	Análisis de varianza para el grupo de muestras experimentales provenientes del café y azúcar, para una relación solvente: mezcla igual a 1:2.....	56
XXVI.	Análisis de varianza para el grupo de muestras experimentales provenientes del café y azúcar, para una relación solvente: mezcla igual a 1:1.....	57
XXVII.	Análisis de varianza para el grupo de muestras experimentales provenientes del café y azúcar, para una relación solvente: mezcla igual a 2:1.....	57

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
2,5 DMF	2,5 Dimetilfurano
5 HMF	5-Hidroximetilfurfural
HCl	Ácido Clorhídrico
API	Grado API
°C	Grado Celsius
kg	Kilogramo
L	Litros
MJ	MegaJoules
m ³	Metro Cúbico
mg	Miligramos
mL	Mililitros
mm ²	Milímetros al cuadrado
min	Minutos
ppm	Partes por millón
%	Porcentaje
pol	Porcentaje de azúcar
pH	Potencial de Hidrógeno
s	Segundo

GLOSARIO

Aldehído	Son compuestos orgánicos caracterizados por poseer el grupo funcional -CHO.
ASTM	American Society for Testing and Materials, por sus siglas en inglés. En español: Sociedad Americana para Pruebas y Materiales.
Azúcares	Hidratos de carbono, están compuestos solamente por carbono, oxígeno e hidrógeno, su característica principal es el sabor dulce.
Biodiésel	Combustible obtenido a partir de aceites vegetales que funciona en cualquier motor diésel, este puede obtener mediante diferentes tipos de aceites por el proceso de transesterificación.
Café cereza	Fruto proveniente de la planta del café.
Caña de azúcar	Planta originaria de la India, con tallo macizo, hojas largas y flores purpúreas. Del tejido esponjoso de su tallo se extrae el azúcar.
Catalizador	Sustancia que altera una reacción química y que puede recuperarse intacta, en forma y cantidad, al final de la reacción.

Cenizas	Está relacionado con la cantidad de materiales no combustibles que pueden estar presentes en un combustible o el porcentaje de materia que se mantiene inerte en la reacción de combustión.
Combustible	Sustancia que reacciona químicamente en presencia de oxígeno, produce calor, CO ₂ , agua y otros componentes.
Combustible alternativo	Aprovechamiento de un combustible en lugar de uno principal.
Deshidratación	Pérdida parcial o total del contenido de agua que forma parte de la especie vegetal.
Destilación	Técnica de separación que consiste en separar dos líquidos aprovechando la diferencia en sus puntos de ebullición. Los vapores de cada componente se condensan y recogen una vez separados.
Diésel 2-D	Fracción del petróleo que destila entre 175-300 grados Celsius y se utiliza comercialmente como combustible por compresión en motores diésel.
Disacárido	Tipo de hidrato de carbono, o carbohidrato, formado por la condensación de dos monosacáridos iguales o distintos mediante enlace O-glucósido (con pérdida de una molécula de agua).

Escala planta piloto	Es una planta de proceso a escala reducida, con el fin de diseñar, construir y obtener información para determinar si un proceso es técnica y económicamente viable.
Escalamiento	Proceso para llevar de un tamaño dado a otro tamaño mayor o menor una operación proceso u objeto.
Especificación	Documento técnico que establece una lista de requisitos o descripciones detalladas de características, propiedades y rangos.
Estándar	Norma de desempeño definida por entidades competentes para una actividad, un proceso, un producto o un servicio.
Extracción	Separación de los componentes de cualquier sustancia por el contacto con un líquido llamado solvente.
Fructosa	Es una forma de azúcar, es un monosacárido con la misma fórmula empírica que la glucosa pero con diferente estructura, además de ser una hexosa pero está cicla en furano.
Furano	Es un compuesto orgánico heterocíclico aromático de cinco lados con un átomo de oxígeno, es un líquido claro, incoloro y altamente inflamable y volátil.

Gasolina	Mezcla de más de doscientos hidrocarburos que van desde butano hasta compuestos del tipo metilnaftalenos que son moléculas de 11 a 12 átomos de carbono, posee estado líquido y es inflamable, su principal uso es en motores de combustión.
Glucosa	Es un monosacárido con fórmula similar a la fructosa pero diferente estructura, está es una aldosa.
Hexosas	Monosacárido formado por una cadena de seis átomos de carbono. Su principal función es producir energía.
Hidrogenación	Es una reacción rédox, cuya finalidad es la adición de hidrógeno (H_2) a otro compuesto.
Índice de cetano	Es un indicativo de la eficiencia de la reacción que se lleva a cabo en los motores de combustión interna.
Índice de refracción	Indicativo de la cantidad que se desvía un rayo de luz al pasar por un medio como el aire, a otro medio, como agua.
Miel de lavado del café	Agua recirculada utilizada en las operaciones unitarias de despulpado y lavado, del proceso de un beneficio húmedo de café.

Miel de tercera del azúcar (melaza)	Líquido pastoso, de color pardo oscuro y sabor muy dulce, que queda de la cristalización de la caña de azúcar o remolacha.
Monosacáridos	Glúcidos más sencillos, que no se hidrolizan conteniendo de tres a seis átomos de carbono. Su fórmula empírica es $(CH_2O)_n$ donde $n \geq 3$.
Mucílago	Sustancia vegetal que recubre el grano de café directamente, por debajo de la pulpa.
Nivel laboratorio	Nivel en el cual se lleva a cabo experimentación a escala reducida, esto con el fin de obtener información del proceso para luego pasar a la escala planta piloto.
Presión de vapor	Presión ejercida por las moléculas en la superficie en su intento por escapar a la atmósfera. Entre mayor la volatilidad de un líquido, mayor su presión de vapor a una temperatura específica. Por lo tanto para una temperatura dada, la presión de vapor es una medida de su volatilidad.
Punto de inflamabilidad	Es la temperatura a la cual el producto forma mezclas inflamables bajo ciertas condiciones de aire.
Reglamento Técnico Centroamericano	RTCA por sus siglas en español, este es el comité que realiza el estudio de adopción de normas internacionales en la región Centroamericana.

Rendimiento	Relación de cantidad producto final obtenido en comparación con cantidad materia prima utilizada.
Sacarosa	Llamada también azúcar común, es un disacárido formado por las moléculas de fructosa y glucosa.
Solvente	Sustancia que está en mayor cantidad en una solución y tiene la capacidad de distribuir en su interior, homogéneamente, otro material que se llama soluto.
Viscosidad	Es la capacidad de fluir de una sustancia bajo ciertas condiciones.
Volátil	Relativo a las sustancias que poseen una mayor tendencia a permanecer en estado gaseoso que en su estado líquido o sólido.
2,5 Dimetilfurano	Es un compuesto heterocíclico de fórmula C_6H_8O , recientes avances han incrementado su atractivo como biocombustible.
5 Hidroximetilfurfural	Es un aldehído y un furano de fórmula $C_6H_6O_3$, este es formado durante la descomposición térmica de los glúcidos, también es conocido como el intermediario del 2,5 dimetilfurano.

RESUMEN

El presente trabajo de investigación consistió en la evaluación a nivel laboratorio de la extracción de 5-hidroximetilfurfural utilizando como materia prima dos fuentes las cuales son miel de tercera del proceso de azúcar y la miel del lavado del café cereza. El 5-hidroximetilfurfural es el compuesto intermedio del 2,5 dimetilfurano el cual es un sustituto del diésel 2-D.

El método para llevar a cabo la extracción del 5-hidroximetilfurfural es la deshidratación ácida de la fructuosa, se propuso un conjunto de extracciones divididas por materia prima, esto para evaluar diferentes parámetros con el fin de determinar las magnitudes óptimas de cada uno.

Para la caracterización del 5-hidroximetilfurfural se utilizó la reacción de Seliwanoff, la cual al agregar resorcinol dará como resultado positivo una reacción de color roja.

Finalmente se proponen las variables para escalar la extracción a nivel planta piloto, además de la adecuada metodología para la disposición de los posibles desechos que se obtengan.

OBJETIVOS

General

Evaluar el rendimiento de extracción de 5-hidroximetilfurfural utilizando como materia prima miel de tercera del proceso de azúcar y miel del desperdicio de café de un beneficio a nivel laboratorio, para su uso como intermediario del 2,5 dimetilfurano sustituto del diésel 2-D.

Específicos

1. Determinar los parámetros de concentración de ácido clorhídrico y fuente de materia prima adecuados para extraer 5-hidroximetilfurfural a nivel laboratorio.
2. Determinar el rendimiento de extracción del 5-hidroximetilfurfural proveniente de la miel de tercera, por medio del método de deshidratación ácida.
3. Determinar el rendimiento de extracción del 5-hidroximetilfurfural proveniente de la miel del descascarado del café por medio del método de deshidratación ácida.
4. Establecer las variables de proceso a nivel laboratorio para su escalamiento a nivel planta piloto.
5. Establecer parámetros para la clasificación y el manejo de los subproductos tanto a nivel laboratorio como en planta piloto.

Hipótesis

Es posible obtener 5-hidroximetilfurfural a partir de la miel de tercera del proceso de azúcar y de las mieles del lavado del café por medio de la deshidratación ácida.

Hipótesis alternativa

Existe diferencia significativa entre el rendimiento promedio, de extracto de 5-hidroximetilfurfural, para cada materia prima.

Hipótesis nula

No existe diferencia significativa entre el rendimiento promedio, de extracto de 5-hidroximetilfurfural, para cada materia prima.

Hipótesis alternativa

Existe diferencia significativa entre el rendimiento promedio, de extracto de 5-hidroximetilfurfural, para cada concentración de ácido clorhídrico.

Hipótesis nula

No existe diferencia significativa entre el rendimiento promedio, de extracto de 5-hidroximetilfurfural, para cada concentración de ácido clorhídrico.

INTRODUCCIÓN

El diésel 2-D es una de las fracciones en el proceso de refinación del petróleo con mayor demanda, debido al amplio uso que se le da en motores de combustión interna.

En años recientes se han encontrado sustitutos del diésel, por ejemplo los biocombustibles, debido a especulaciones sobre el precio fluctuante y escases del petróleo. Se han realizado numerosas investigaciones experimentales sobre el uso de biocombustibles en motores convencionales, las cuales van desde el uso de mezclas parciales de biocombustible/diésel hasta la sustitución total de este último.

Las características de los suelos y condiciones de Guatemala lo convierten en un país con gran potencialidad en el campo de los biocombustibles. Entre ellos se encuentra el 2,5 dimetilfurano, el cual es un combustible líquido muy similar en propiedades al diésel 2D, pero este es obtenido de materiales biológicos, los cuales son subproductos de otros procesos, como lo son la miel de tercera del proceso de azúcar y la miel del lavado del café cereza.

La obtención de 2,5 dimetilfurano a partir de fructosa por medio del intermediario 5-hidroximetilfurfural ofrece una mejora al uso de las materias primas, debido a su proceso fácil y práctico, además que posee ventajas en su producción, propiedades fisicoquímicas y factibilidad técnica sobre los biocombustibles actuales que son el bioetanol y el biodiésel.

1. ANTECEDENTES

En 1989, se publicó en la *Revista Alimentaria* el estudio titulado: Cinética de formación del 5-Hidroximetilfurfural en concentrado de zumo de pera almacenado a distintas temperaturas, en este estudio se describe a fondo la cinética de formación del 5-hidroximetilfurfural proveniente de la fructosa.

En noviembre de 1994, se publicó el estudio de tesis en la Universidad de San Carlos de Guatemala, titulada: *Efecto de la temperatura de filtrado, en la elevación de 5-hidroximetilfurfural en miel*, elaborado por Edwin Adelberto Muñoz Espinoza, en la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia. En este estudio se describe la cinética de formación del 5-hidroximetilfurfural a diferentes temperaturas.

En marzo de 1996 se realiza un estudio de tesis en la Universidad San Carlos de Guatemala, titulada: *Determinación cuantitativa del 5-hidroximetilfurfural en mieles vírgenes y procesadas de los departamentos de Escuintla y Zacapa por espectrometría visible*, elaborado por Milvia Maritza Rivera Zamora, en la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia. En este estudio se detallan los parámetros y procedimientos para determinar el 5-hidroximetilfurfural, el cual es un compuesto precursor para la formación del 2,5 dimetilfurano.

El 10 de diciembre de 1998 aparece un artículo en la revista *The Journal of Physical Chemistry*, titulado: Thermal Decomposition of 2,5-Dimethylfuran. Experimental Results and Computer Modeling, en donde se encuentra un detallado interés sobre la descomposición y productos del 2,5 dimetilfurano. En

este estudio se hace una revisión de la cinética de descomposición dando como resultados constantes de primer orden y una simulación por medio de programas de computación para guiar un esquema de reacción.

El 21 de diciembre de 1999 se realizó un estudio el cual se publicó en la revista *Combinatorial Science* titulado: 2,5-Dimethylfuran (DMFu): An Internal Standard for the Traceless Quantitation of Unknown Samples via ^1H NMR en donde se detallan las características fisicoquímicas del 2,5 dimetilfurano, además es usado como estándar interno para la cuantificación de muestras desconocidas de hidrocarburos debido a su baja reactividad química y buena solubilidad en disolventes seleccionados.

El 21 de junio de 2007, en la Universidad de Wisconsin-Madison Estados Unidos se realizó el estudio titulado: *La producción de 2,5 dimetilfurano como combustible líquido derivado de carbohidratos provenientes de la biomasa, en donde se propone al 2,5 dimetilfurano proveniente de la fructosa como combustible renovable, en vez del etanol*, en este estudio se propones varias ventajas del nuevo combustible sobre los que existen, además se proponen métodos para su extracción.

El 9 de abril de 2010 aparece un artículo en la revista *Energy & Fuels* titulado: Combustión y emisiones del 2,5 dimetilfurano en un motor de encendido por chispa de inyección directa, en esta investigación se llevaron a cabo experimentos en un cilindro de gasolina de inyección directa, para estudiar el rendimiento del 2,5 dimetilfurano contra la gasolina y contra el etanol. Los resultados obtenidos son una combustión similar del 2,5 dimetilfurano a la de la gasolina comercial, rendimientos más altos contra el etanol y emisiones más bajas contra la gasolina.

El 28 de mayo de 2010, aparece en la revista *Green Chemistry* el artículo titulado: Un enfoque catalítico de dos etapas para la conversión de glucosa a 2,5 dimetilfurano en los líquidos iónicos, en donde se identifican los catalizadores para la deshidratación del compuesto intermedio 5-hidroximetilfurfural, para la producción de 2,5 dimetilfurano, mediante el uso de ácido 12-molibdofosfórico en una solución de cloruro 1-etil-3-metilimidazolio y acetonitrilo.

El 2 de agosto del 2010, aparece en la revista *Angewandte Chemie* una investigación titulada: Producción eficiente del combustible líquido 2,5 dimetilfurano proveniente de la fructosa utilizando ácido fórmico como reactivo, en donde se proveen métodos alternativos de producción del nuevo combustible líquido, dando diferentes formas para extracción y purificación.

El 1 de mayo del 2011, las Universidades de Iowa y Wisconsin, lanzan un estudio titulado: *Análisis técnicoeconómico de la producción de 2,5 dimetilfurano y 5-hidroximetilfurfural provenientes de fructosa pura por medio de un proceso catalítico*, en donde se proponen parámetros para la producción en masa de estos combustibles, además describen los equipos y parámetros que se deberían de utilizar para altos rendimientos.

El 1 de marzo del 2012 en la revista *Carbohydrate Research Magazine* se publicó el artículo titulado: La conversión de la fructosa en 5-hidroximetilfurfural y sus derivados promovidos por sales inorgánicas en alcohol, en esta publicación se detallan los rendimientos que se obtendrán mediante sales como NH_4Cl como deshidratante de la fructosa. Este método cambia la estrategia de conversión del 5-hidroximetilfurfural ya que en los estudios anteriores se realiza mediante ácidos minerales.

En Guatemala no existen estudios del rendimiento del 5-hidroximetilfurfural ni de la producción del 2,5 dimetilfurano como sustituto del diésel.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Combustibles

Los combustibles son sustancias carburantes, cuya energía química, liberada en la reacción de combustión, busca aprovecharse. Para que la reacción se pueda llevar a cabo se requiere la presencia del combustible, oxígeno y de una fuente de ignición (llama, chispa o calor). Los productos de la reacción completa son CO_2 y H_2O además de la liberación de energía. La importancia de los combustibles radica en que la energía química se puede convertir en energía calorífica, eléctrica o mecánica con el equipo adecuado¹.

La utilización de un combustible parte de un requerimiento energético, de una necesidad y para suplirla no solo se busca cualquier combustible sino el que mejor se adapte, que no tenga problemas de disponibilidad y que cuya utilización no sea un problema en el futuro.

2.1.1. Biocombustibles

Se entiende por biocombustible aquellos combustibles que se obtienen de biomasa. El término biomasa, en el sentido amplio, se refiere a cualquier tipo de materia orgánica que haya tenido su origen inmediato en el proceso biológico de organismos recientemente vivos, como plantas, o sus desechos metabólicos. El concepto de biomasa comprende productos tanto de origen vegetal como de origen animal.

¹ Calidad Del Petróleo Diésel. Disponible en: <www.cipres.cec.uchile.cl/~aletelie/index.html>
[Consulta: 14 de diciembre de 2012]

En la actualidad se ha aceptado este término para denominar al grupo de productos energéticos y materias primas de tipo renovable que se origina a partir de la materia prima orgánica formada por vía biológica. Quedan por tanto fuera de este concepto los combustibles fósiles o los productos orgánicos derivados de ellos. Hoy en día se pueden diferenciar distintos tipos de biomasa.

Existe gran variedad de biocombustibles por ejemplo alcoholes, éteres, ésteres y otros productos químicos que provienen de compuestos orgánicos de base celulósica (biomasa), los cuales sustituyen parcial o completamente uso de la gasolina en el transporte o destinados a producir electricidad.

Las materias primas actuales habitualmente son: azúcar, trigo, maíz o semillas oleaginosas. El empleo de estos biocombustibles tiene como objetivo principal reducir las emisiones de gases de efecto invernadero que sobrecalientan la superficie terrestre y aceleran el cambio climático. El uso de la biomasa para consumo energético reduce las emisiones de CO₂ en la atmósfera a diferencia del uso de hidrocarburos, lo que permite disminuir el impacto negativo que se tiene por parte de los combustibles fósiles sobre el cambio climático.

Los biocombustibles más desarrollados y usados son el bioetanol y el biodiésel; otras alternativas son el biopropanol y el biobutanol, que son hasta ahora menos populares.²

² SALINA, Edmar. *Biocombustibles*. p. 1-8.

2.1.1.1. Clasificación de biocombustibles

Según la naturaleza de la biomasa, su uso energético, la cantidad de producción y el uso del biocombustible, se puede contar con diferentes clasificaciones, estos pueden ser divididos en las siguientes categorías:

- Biocombustibles de primera generación: son aquellos que en la actualidad ya han alcanzado una etapa de producción comercial. En general, proceden de cosechas cultivadas con técnicas similares a las cosechas alimenticias.
- Biocombustibles de segunda generación: no compiten por la utilización de suelos agrícolas, sino que son producidos a partir de biomasa lignocelulósica como la contenida en la paja, hierba, tallos, cañas, raíces, madera, cáscaras, aceites vegetal, aceites de origen animal, o subproductos de procesos como por ejemplo la miel de tercera del proceso de azúcar.
- Biocombustibles de tercera generación: son principalmente, los aceites procedentes de algas y el hidrógeno procedente de la biomasa. Aún se encuentran en una fase incipiente de desarrollo y muy lejos de su producción a gran escala y, por tanto, de su comercialización, por lo que se espera que tengan una gran producción en el corto plazo.

2.1.1.2. Biodiésel

El biodiésel es un biocombustible líquido muy similar en propiedades al aceite diésel, pero obtenido de diferentes fuentes de materia prima. El biodiésel puro es biodegradable, no tóxico y esencialmente libre de azufre y compuestos aromáticos, sin importar significativamente el alcohol y el aceite vegetal que se

utilice en la transesterificación. El biodiésel se clasifica tanto en la primera y segunda generación, ya que se puede obtener de ambas fuentes de materia prima, por ejemplo de cultivos de maíz (primera generación), y de aceites de fritura (segunda generación).

Generalmente el biodiésel se produce mediante la transesterificación de grasas y aceites con alcohol metílico en ambiente básico. Los catalizadores a emplear pueden ser soda cáustica o metiliato sódico, ambos en solución metanólica.

El biodiésel puede mezclarse con diésel 2-D procedente del refinado del petróleo en diferentes cantidades. Se utilizan notaciones abreviadas según el porcentaje por volumen de biodiésel en la mezcla: B100 en caso de utilizar sólo biodiésel, u otras notaciones como B5, B15, B30 o B50, donde la numeración indica el porcentaje por volumen de biodiésel en la mezcla.

El biodiésel, desde el punto de vista de la inflamabilidad y toxicidad, es más seguro que el diésel proveniente del petróleo, no es peligroso para el ambiente y es biodegradable.

Tabla I. **Ventajas y desventajas del biodiésel**

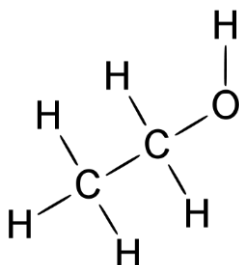
Ventajas	Desventajas
Un ahorro de entre un 25 por ciento a un 80 por ciento de las emisiones de CO ₂ producidas.	El producto se degrada notoriamente más rápido que el diésel.
Por su mayor índice de octano y lubricación reduce el desgaste en la bomba de inyección y en las toberas.	Posee mayor viscosidad que el diésel generando problemas en la bomba de distribución.
No tiene compuestos de azufre por lo que no los elimina como gases de combustión.	Posee menor capacidad calorífica que el diésel.
	Aumenta las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO _x).

Fuente: elaboración propia.

2.1.1.3. Bioetanol

El bioetanol es un compuesto químico obtenido a partir de la fermentación de los azúcares que puede utilizarse como combustible, solo, o bien mezclado en cantidades variadas con gasolina, y su uso se ha extendido principalmente para reemplazar el consumo de derivados del petróleo. Este es un alcohol que se presenta en condiciones normales de presión y temperatura como un líquido incoloro e inflamable con un punto de ebullición de 78 grados Celsius.

Figura 1. **Estructura química del etanol**



Fuente: MC. MURRY, John. *Organic Chemistry*, p. 660.

El combustible resultante de la mezcla de etanol y gasolina se conoce como gasohol oalconafta. Dos mezclas comunes son E10 y E85, con contenidos de etanol del 10 por ciento y 85 por ciento, respectivamente. El bioetanol se clasifica tanto en la primera y segunda generación, ya que se puede obtener de ambas fuentes de materia prima, por ejemplo cultivos de caña (primera generación), y de miel de tercera del proceso de azúcar (segunda generación).

El etanol también se utiliza cada vez más como añadido para oxigenar la gasolina estándar, reemplazando al éter metiltertbutílico (MTBE). Este último es responsable de una considerable contaminación del suelo y del agua subterránea. También puede utilizarse como combustible en las celdas de combustible.

Desde la antigüedad se obtiene el etanol por fermentación anaeróbica de azúcares con levadura en solución acuosa y posterior destilación. El método más antiguo para separar el etanol del agua es la destilación simple, pero la pureza está limitada a un 95-96 por ciento debido a la formación de un azeótropo de agua-etanol de bajo punto de ebullición.

Para poder utilizar el etanol como combustible mezclándolo con gasolina, hay que eliminar el agua hasta alcanzar una pureza del 99,5 al 99,9 por ciento. El valor exacto depende de la temperatura, que determina cuándo ocurre la separación entre las fases agua e hidrocarburos.

Para obtener etanol libre de agua se aplica la destilación azeotrópica en una mezcla con benceno o ciclohexano. De estas mezclas se destila a temperaturas más bajas el azeótropo, formado por el disolvente auxiliar con el agua, mientras que el etanol se queda retenido.

Tabla II. **Ventajas y desventajas del bioetanol**

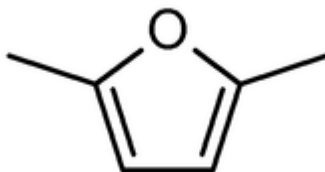
Ventajas	Desventajas
Fácil obtención, a partir de destilación	Crea mezclas con el agua lo que corroe el motor y partes metálicas
Alto contenido de oxígeno comparado con el diésel	Bajo poder calorífico comparado con el diésel

Fuente: elaboración propia.

2.1.1.4. 2,5 dimetilfurano (DMF)

El 2,5-dimetilfurano o DMF es un compuesto heterocíclico de fórmula C_6H_8O . Recientes avances han incrementado su atractivo como biocombustible. Este es un compuesto que se obtiene de fuentes ricas en fructosa, su obtención es mediante deshidratación ácida de la fructuosa para obtener 5-hidroximetilfurfural y luego este se hidrogena catalíticamente.

Figura 2. **Estructura química del 2,5 dimetilfurano**



Fuente: JAMES, Dumesic. *Chemical Engineering Journal* 1 Mayo 2011, Vol. 169, p. 983.

El DMF tiene numerosas utilidades como biocombustible. Tiene una densidad de energía un 40 por ciento mayor que el etanol, lo cual hace que sea comparable a la gasolina. Es también químicamente estable (no reacciona violentamente en condiciones normales de trabajo con otros compuestos), es insoluble en agua por lo que no corroe metales hace puntos azeotrópicos. La evaporación del DMF durante el proceso de producción requiere aproximadamente un tercio menos de energía de la necesaria para hacer evaporar al etanol, aunque tiene un punto de ebullición mayor que el del etanol (78 grados Celsius).³

La posibilidad de producir rápida y eficazmente DMF a partir de fructosa o glucosa hacen favorable que éste sea utilizado como biocombustible. Actualmente el bioetanol y el biodiésel son los principales biocombustibles líquidos. Una característica del DMF es que posee un punto de ebullición más alto que el etanol (es decir, el DMF es menos volátil y permanece líquido en el depósito de combustible y en vapor en el motor).

³ JAMES, Dumesic. *Chemical Engineering Journal* 1 Mayo 2011, Vol. 169, P. 329-338

Tabla III. **Propiedades fisicoquímicas del DMF**

Número CAS	625-86-5
Solubilidad en agua	Insoluble
Punto de fusión	62 °C
Masa molar	96,12 g/mol
Densidad	0,903g/cm ³
Punto de ebullición	93 °C (1013hPa)
Presión de Vapor	50hPa (20 °C)
Temperatura de inflamabilidad	1 °C
Índice de refracción	1,438 – 1,443

Fuente: SHAOHUA, Zhong. *Energy & Fuels* Vol. 24 p. 2891-2899.

La relación estequiométrica de aire/combustible en el DMF es de 10,72 en comparación con el etanol a 8,95 y el diésel en 14,56. Esto significa que al quemar una cantidad de DMF se requiere un 33 por ciento menos aire que una misma cantidad de diésel, pero un 20 por ciento más aire que una cantidad igual de etanol.

El poder calorífico del DMF es de 33,7 MegaJoules por kilogramo, en comparación con el del etanol que es 26,9 MegaJoules por kilogramo y 44,96 del diésel. Según nuevas investigaciones el índice de cetano es 119. Se han realizado recientes pruebas en un motor de diésel de un solo cilindro, en estas se ha encontrado que la eficiencia térmica del DMF es similar a la de la gasolina convencional.⁴

Debido a su fuente de materia prima, el DMF se clasifica como biocombustible de segunda generación, cabe resaltar que éste puede ser obtenido de cualquier fuente de fructosa.

⁴ SHAOHUA, Zhong. *Energy & Fuels* Vol. 24 p. 2891-2899.

Tabla IV. **Comparación entre DMF-etanol-gasolina-diésel**

Propiedades de los Combustibles					
Propiedades	Unidades	DMF	Etanol	Gasolina	Diésel
Fórmula molecular	-	C ₆ H ₈ O	C ₂ H ₆ O	C ₂ - C ₁₄	C ₁₂ - C ₁₆
Masa molecular	kg / mol	96,13	46,07	100-180	144-210
Densidad a 20 ° C	kg / m ³	889,7	790,7	744,6	832,0
Solubilidad en agua a 25 ° C	mg / mL	Insoluble	Altamente soluble	Insoluble	Insoluble
Contenido gravimétrico de oxígeno	%	16,67	34,78	0	0
Radio H/C	-	1,33	3,00	1,865	1,750
Radio O/C	-	0,17	0,5	0	0
Estequiometria de aire/combustible	-	10,72	8,95	14,56	14,7
Poder calorífico (por kilogramo)	MJ / kg	33,7	26,9	43,20	44,96
Poder calorífico (por litro)	MJ / L	30	21,3	32,20	35,86
Número de octano	-	119	110	95,80	98,0
Temperatura de autoignición	°C	285,85	423	257	250 - 270
Calor latente de vaporización a 20 °C	kJ / mol	31,91	43,25	38,51	37,6

Fuente: SHAOHUA, Zhong. *Energy & Fuels* Vol. 24 p. 2891-2899.

Las emisiones de CO, HC y NO_x utilizando DMF son menores a las de la gasolina. La combustión del etanol produce menos emisiones de CO debido la temperatura de combustión, y a una combustión más completa. A bajas cargas, el etanol produce pequeñas cantidades de HC, probablemente debido a su contenido de oxígeno relativamente alto, que da lugar a una combustión más completa. El etanol también produce menores emisiones de NO_x para el rango

de carga, posiblemente debido a su mayor calor latente de evaporación, lo que lleva a una relativamente baja temperatura dentro del cilindro.

En general, los experimentos confirman que, debido a las propiedades fisicoquímicas similares entre el DMF y la gasolina (como por ejemplo una combustión similar, emisiones similares) por lo que indica que “el DMF puede ser adecuado para el uso como combustible en motores de diésel o gasolina y que no se requieren grandes modificaciones o ajustes, el DMF produce un rendimiento de motor equivalente al de la gasolina convencional”.⁵

Tabla V. **Información de seguridad del 2,5 dimetilfurano**

H225: Líquido y vapores muy inflamables
H302: Nocivo en caso de ingestión.
H315: Provoca irritación cutánea.
H317: Puede provocar una reacción alérgica en la piel.
H319: Provoca irritación ocular grave.
P210: Mantener alejado de fuentes de calor, chispas, llama abierta o superficies calientes, No fumar.
P260: No respirar los vapores.
P280: Llevar guantes de protección.
P302 + P352: EN CASO DE CONTACTO CON LA PIEL: Lavar con agua y jabón abundantes.
P304 + P340: EN CASO DE INHALACIÓN: Transportar a la víctima al exterior y mantenerla en reposo en una posición confortable para respirar.
P305 + P351 + P338: EN CASO DE CONTACTO CON LOS OJOS: Enjuagar con agua cuidadosamente durante varios minutos. Quitar las lentes de contacto cuando estén presentes y pueda hacerse con facilidad. Proseguir con el lavado.
P403 + P235: Almacenar en un lugar bien ventilado. Mantener en lugar fresco.

Fuente: Ficha seguridad Merck.

⁵ SHAOHUA, Zhong. *Energy & Fuels* Vol. 24 p. 2891-2899

2.1.2. Protocolo de Kioto

El Protocolo de Kioto sobre el cambio climático parte de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) y un acuerdo internacional que tiene por objetivo reducir las emisiones de seis gases de efecto invernadero que causan el calentamiento global: dióxido de carbono (CO_2) procedente en su mayoría del consumo de combustibles fósiles, gas metano (CH_4) procedente en su mayoría de la agricultura, y óxido nitroso (N_2O) empleado en fertilizantes, además de tres gases industriales fluorados empleados como refrigerantes, conductores del calor y aislantes respectivamente: hidrofluorocarbonos (HFC), perfluorocarbonos (PFC) y hexafluoruro de azufre (SF_6).

El objetivo de producir biocombustibles es reemplazar a los combustibles fósiles, en concordancia con el compromiso del Protocolo de Kioto.

2.1.3. Criterios para determinar la eficiencia de un combustible

Los criterios para determinar la eficiencia de un combustible comercial dependen tanto del proceso de fabricación como de la naturaleza del petróleo a partir del cual ha sido producido, a continuación se enlistan los más importantes:

2.1.3.1. Potencia calorífica

El calor de combustión de los hidrocarburos y de casi todos los demás combustibles puede calcularse partiendo de los datos termoquímicos relativos a los calores de formación. Los hidrocarburos tienen pocos competidores en lo

que respecta a la potencia calorífica por kilogramo o litro de combustible, en especial si se tiene en cuenta la facilidad para obtenerlos.

2.1.3.2. Volatilidad

Tiene mucha importancia para el rendimiento de un combustible. En general, es necesario tener en cuenta la volatilidad del combustible, el diseño del motor, la instalación del motor y accesorios, la temperatura y la presión de la atmósfera en el punto en que se usa llegando a una interacción satisfactoria entre todos estos factores.

La fluidez de los combustibles derivados del petróleo también es un factor importante en su uso general. En los combustibles destilados del petróleo usados generalmente en los motores de combustión interna, se tropieza con pocas dificultades, salvo en tiempo muy frío. Para los combustibles más viscosos, como los aceites pesados diésel, se prueba la fluidez por los métodos ASTM para la viscosidad, el punto de turbiedad y derrame, las cenizas, el agua y los sedimentos. Algunos combustibles poseen una capacidad apreciable para disolver agua, por lo que pueden provocar dificultades a temperaturas bajas ya que surge la formación de pequeños cristales de hielo que pueden obstruir los filtros para el combustible.

2.1.3.3. Estabilidad en almacenamiento

Como sucede con casi todos los materiales orgánicos, el almacenamiento de la gasolina durante largo tiempo, incluso a temperatura moderada, puede conducir a una ligera oxidación y a la formación de materiales gomosos que pueden provocar dificultades en el sistema de combustible de un motor. El ensayo ASTM D381-49 sirve para determinar la goma existente y los ASTM D525-49 y D873-49 dan los procedimientos para evaluar la estabilidad contra la

oxidación con el fin de calcular la tendencia del cobre, valúa la estabilidad indicando la goma existente y la tendencia del cobre a catalizar la formación de gomas.

2.1.3.4. Seguridad

Puesto que los hidrocarburos volátiles entrañan peligro de incendio además algunos aditivos antidetonantes como el tetraetiluro de plomo son venenosos, es necesario hacer desaparecer los peligros propios del uso del combustibles almacenados, sin embargo, si se almacena en tanques con acceso al aire esté se volatizara parcialmente por lo que se producirán mezclas de aire-hidrocarburo, si esta mezcla se encuentra en los límites explosivos puede producirse un incendio o una explosión.

“El peligro de incendio puede evitarse manteniendo la concentración del combustible tan baja que sea inferior al límite inferior de explosividad en las mezclas pobres o superior al límite superior para las mezclas ricas”⁶.

2.1.4. Combustible diésel

El diésel o también llamado aceite combustible Diésel No. 2-D (automotriz), es una de las fracciones más importantes del petróleo, utilizada en equipos industriales, transporte pesado y en un pequeño pero creciente porcentaje de transporte liviano. Es una mezcla líquida a temperatura ambiente que se compone de una mezcla de hidrocarburos pesados de cadenas largas (como $C_{14}H_{30}$) y compuestos nafténicos, de apariencia aceitosa y color amarillo.

Su gran aceptación radica en su alto poder calorífico (44,96 MegaJoules por kilogramo) y poca volatilidad que lo hacen un combustible eficiente y

⁶ PEREZ, Leonel. *Caracterización de las propiedades fisicoquímicas de los aceites lubricantes SAE-40 USAC*, Facultad de Ingeniería 2000.

seguro, comparado con la gasolina, que tiene un poder calorífico ligeramente menor (43,20 MegaJoules por kilogramo) y es mucho más volátil. Su uso inició cuando Rudolf Diésel, en 1892, obtuvo la patente del motor diésel en su búsqueda de un motor más eficiente que el accionado por gasolina (inventado en 1872).

En vez de utilizar una chispa para encender la mezcla de combustible/aire, propuso inyectar el combustible al aire comprimido ya que el calor del aire comprimido sería suficiente para quemar el combustible. Estos principios aún son la esencia del funcionamiento del motor que lleva su nombre. En la actualidad los motores accionados por combustible diésel son muy eficientes y desarrollan potencias elevadas.

2.1.4.1. Calidad del diésel

El Índice de Cetano es la medida de la calidad de ignición y capacidad antidetonante y es indicativo del grado de eficiencia de la combustión en el motor, de forma tal que se produzca la máxima cantidad de energía aprovechable.

A mayor Índice de Cetano, mejor es el diésel. Otro parámetro importante es el contenido de azufre. Su efecto se manifiesta en un desgaste de la máquina. A menor contenido de este elemento, el combustible es más limpio y menos contaminante.⁷

⁷ Calidad Del Petróleo Diésel. Disponible en: <www.cipres.cec.uchile.cl/~aletelie/index.html> [Consulta: 14 de diciembre de 2012]

Tabla VI. **Ventajas y desventajas del diésel**

Ventajas	Desventajas
Menor evaporación que la gasolina	Mayor limpieza en los motores que la gasolina
Mayor poder calorífico que la gasolina	Mayor porcentaje de azufre comparado con el biodiésel
Menor emisión de CO ₂ comparado con la gasolina	Mayor emisión de CO ₂ comparado con el Biodiésel
Puede ser sustituido por el etanol en mezclas parciales o totales	

Fuente: elaboración propia.

Según la norma RTCA (Reglamento Técnico Centroamericano) 75.01.17:05 Productos de Petróleo. Aceite Combustible Diésel No. 2-D (automotriz) Especificaciones, tomada en base a las normas ASTM las propiedades y métodos de prueba del diésel son:

Tabla VII. **Propiedades y métodos de prueba del diésel**

CARACTERÍSTICA	UNIDADES	MÉTODO ASTM	VALORES
Apariencia	-----	D-4176	Claro y Brillante
Aditivos	-----	-----	Reportar
Color ASTM	-----	D-1500	3.0 máx.
Índice de Cetano Calculado	-----	D-976	45 mín.
Número de Cetano	-----	D-613	45 mín.
Corrosión tira de cobre, 3 h, 50°C.	-----	D-130	No.2 máx.
Contenido de cenizas	% masa	D-482	0,01 máx.
Contenido de azufre total	ppm	D-129	500 máx.
Residuo de carbón Conradson en 10% residuo o Residuo de carbón Ramsbottom en 10% residuo	% masa	D-189	0,10 máx.
		D-524	0,13 máx.
Agua y sedimentos	% volumen	D-2709 ó D-1796	0,05 máx.
Punto de inflamación (Flash Point)	°C	D-93	52 mín.
Gravedad API a 15,56 °C (60 °F) o Densidad a 15 °C	°API	D-287	Reportar
	kg/m ³	D-1298	
Punto de Escurrimiento	°C	D-97	Reportar
Punto de Enturbamiento	°C	D-2500	10 máx.
Viscosidad Cinemática a 40 °C	mm ² /s	D-445	1,9 - 4,1
Destilación:		D-86	
10% recuperados	°C		Reportar
50% recuperados	°C		Reportar
90% recuperados	°C		360 máx.
Punto final de ebullición	°C		Reportar
Aromáticos.	% volumen	D-1319 ó D-5186	33 máx.

Fuente: Norma RTCA 75.01.17:05.

2.2. Glúcidos, carbohidratos, hidratos de carbono o sacáridos

Los glúcidos, carbohidratos, hidratos de carbono o sacáridos son biomoléculas compuestas en su mayor parte por átomos de carbono e hidrógeno y en una menor cantidad de oxígeno. Los glúcidos tienen enlaces químicos difíciles de romper de tipo covalente, pero que almacenan gran cantidad de energía, que es liberada cuando la molécula es oxidada. En la

naturaleza son un constituyente esencial de los seres vivos, formando parte de biomoléculas aisladas o asociadas a otras como las proteínas y los lípidos, siendo los compuestos orgánicos más abundantes en la naturaleza. La glucosa es sintetizada por las plantas verdes mediante la fotosíntesis a partir de materia inorgánica (CO_2 y H_2O).

Los glúcidos desempeñan dos papeles fundamentales en los seres vivos. Por un lado son moléculas energéticas de uso inmediato para las células (glucosa) o que se almacenan para su posterior consumo (almidón y glucógeno); 1 gramo proporciona 4 kilocalorías. Por otra parte, algunos polisacáridos tienen una importante función estructural ya que forman parte de la pared celular de los vegetales (celulosa) o de la cutícula de los artrópodos.

Los glúcidos pueden sufrir reacciones de esterificación, aminación, reducción, oxidación, lo cual otorga a cada una de las estructuras una propiedad específica, como puede ser de solubilidad.

“Los glúcidos se dividen en monosacáridos, disacáridos, oligosacáridos y polisacáridos”⁸.

2.2.1. Monosacáridos

Los glúcidos más simples, los monosacáridos, están formados por una sola molécula; no pueden ser hidrolizados a glúcidos más pequeños. La fórmula química general de un monosacárido no modificado es $(\text{CH}_2\text{O})_n$, donde n es cualquier número igual o mayor a tres, su límite es de 7 carbonos. Los monosacáridos poseen siempre un grupo carbonilo en uno de sus átomos de carbono y grupos hidroxilo en el resto, por lo que pueden considerarse

⁸ MC. MURRY, John. *Organic Chemistry*. p. 660

polialcoholes. Por tanto se definen químicamente como polihidroxialdehídos o pihidroxicetonas.

Los monosacáridos se clasifican de acuerdo a tres características diferentes: la posición del grupo carbonilo, el número de átomos de carbono que contiene y su quiralidad. Si el grupo carbonilo es un aldehído, el monosacárido es una aldosa; si el grupo carbonilo es una cetona, el monosacárido es una cetosa. Los monosacáridos más pequeños son los que poseen tres átomos de carbono, y son llamados triosas; aquellos con cuatro son llamados tetrasas, lo que poseen cinco son llamados pentosas, seis son llamados hexosas y así sucesivamente.

Los sistemas de clasificación son frecuentemente combinados; por ejemplo, la glucosa es una aldohexosa (un aldehído de seis átomos de carbono), la ribosa es una aldopentosa (un aldehído de cinco átomos de carbono) y la fructosa es una cetohexosa (una cetona de seis átomos de carbono).

Cada átomo de carbono posee un grupo de hidroxilo (OH), con la excepción del primero y el último carbono, todos son asimétricos, haciéndolos centros estéricos con dos posibles configuraciones cada uno (el H y OH pueden estar a cualquier lado del átomo de carbono). Debido a esta asimetría, cada monosacárido posee un cierto número de isómeros. Por ejemplo, la aldohexosa D-glucosa, tienen la fórmula $(\text{CH}_2\text{O})_6$, de la cual, exceptuando dos de sus seis átomos de carbono, todos son centros quirales, haciendo que la D-glucosa sea uno de los estereoisómeros posibles.

En el caso del gliceraldehído, una aldotriosa, existe un par de posibles esteroisómeros, los cuales son enantiómeros y epímeros (1,3-dihidroxiacetona, la cetosa correspondiente, es una molécula simétrica que no posee centros quirales). La designación D o L es realizada de acuerdo a la orientación del carbono asimétrico más alejados del grupo carbonilo: si el grupo hidroxilo está a la derecha de la molécula es un azúcar D, si está a la izquierda es un azúcar L. Como los D azúcares son los más comunes, usualmente la letra D es omitida.

2.2.2. Disacáridos

Los disacáridos son glúcidos formados por dos moléculas de monosacáridos y, por tanto, al hidrolizarse producen dos monosacáridos libres. Los dos monosacáridos se unen mediante un enlace covalente conocido como enlace glucosídico, “tras una reacción de deshidratación que implica la pérdida de un átomo de hidrógeno de un monosacárido y un grupo hidroxilo del otro monosacárido, con la consecuente formación de una molécula de H_2O , de manera que la fórmula de los disacáridos no modificados es $C_{12}H_{22}O_{11}$ ”⁹.

2.2.2.1. Sacarosa

La sacarosa es el disacárido más abundante y la principal forma en la cual los glúcidos son transportados en las plantas. Está compuesto de una molécula de glucosa y una molécula de fructosa. El nombre sistemático de la sacarosa, O- α -D-glucopiranosil-(1 \rightarrow 2)- β -D-fructofuranósido, indica cuatro cosas:

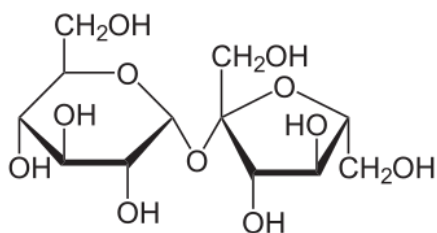
- Sus monosacáridos: glucosa y fructosa. Los glúcidos, carbohidratos, hidratos de carbono o sacáridos (del griego σάκχαρ azúcar) son biomoléculas compuestas por carbono, hidrógeno y oxígeno.

⁹ MC. MURRY, John. *Organic Chemistry*. p. 1029.

- La glucosa, el glucógeno y el almidón son las formas biológicas primarias de almacenamiento y consumo de energía.
- La celulosa forma la pared celular de las células vegetales.
- La quitina es el principal constituyente del exoesqueleto de los artrópodos.

“Este disacárido no tiene poder reductor sobre el reactivo de Fehling y el reactivo de Tollens”¹⁰.

Figura 3. **Estructura química de la sacarosa**



Fuente: MC. MURRY, John. *Organic Chemistry*, p. 1031.

2.2.2.1.1. Hexosas

Son monosacáridos (glúcidos simples) formados por una cadena de seis átomos de carbono. Su fórmula general es $C_6H_{12}O_6$. Su principal función es producir energía. Un gramo de cualquier hexosa produce unas 4 kilocalorías de energía. Las más importantes desde el punto de vista biológico son: glucosa, galactosa y fructosa.

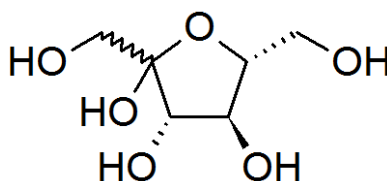
¹⁰ MC. MURRY, John. *Organic Chemistry*. p. 1031.

2.2.2.1.2. Fructosa

También llamada levulosa, es una forma de azúcar encontrada en las frutas y en la miel. Es un monosacárido con la misma fórmula empírica que la glucosa pero con diferente estructura. Es una hexosa (6 átomos de carbono), pero cicla en furano (al contrario que las otras hexosas, que lo hacen en pirano). Su poder energético es de 4 kilocalorías por cada gramo. Su fórmula química es $C_6H_{12}O_6$.

“Todas las frutas naturales tienen cierta cantidad de fructosa (a menudo con glucosa), que puede ser extraída y concentrada para hacer un azúcar alternativo. Junto con la glucosa forman un disacárido llamado sacarosa o azúcar común”¹¹.

Figura 4. Estructura química de la fructosa



Fuente: MC. MURRY, John. *Organic Chemistry*, p. 1032.

2.2.3. Reacción de Seliwanoff

La prueba de Seliwanoff es una prueba química que se usa para distinguir entre aldosas y cetosas. Los azúcares son distinguidos a través de su función como cetona o aldehído. Si el azúcar contiene un grupo cetona, es una cetosa, y si contienen un grupo aldehído, es una aldosa. Esta prueba está basada en el

¹¹ MC. MURRY, John. *Organic Chemistry*. p. 1320.

hecho de que, al calentarlas, las cetosas son deshidratadas más rápido que las aldosas.

El reactivo consiste en resorcinol y ácido clorhídrico concentrado:

- La hidrólisis ácida de polisacáridos y oligosacáridos da azúcares simples.
- Entonces la cetosa deshidratada reacciona con el resorcinol para producir un color rojo. Es posible que las aldosas reaccionen produciendo un leve color rosa.

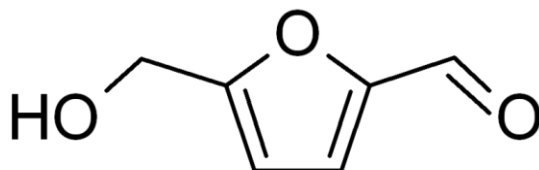
La fructosa da positiva a esta prueba. La sacarosa da negativa a esta prueba ya que la molécula, si bien está constituida por glucosa y fructosa, en la unión alfa (1-2) se anulan las propiedades reductoras de la glucosa y la fructosa, por lo que no da positiva, la sacarosa da positiva cuando se le realiza una hidrólisis ácida, lo que la convierte en un azúcar invertido, donde se rompe el enlace alfa (1-2) y permite que la reacción con esta prueba dé positivo.

2.2.4. 5-Hidroximetilfurfural

Hidroximetilfurfural, HMF o 5-Hidroximetilfurfural es un aldehído y un furano formado durante la descomposición térmica de los glúcidos. “El HMF se ha identificado en una variedad de alimentos procesados incluyendo leche, jugos de frutas, bebidas alcohólicas, miel, otros. Este compuesto es un intermediario para la formación del 2,5 dimetilfurano”¹².

¹² MC. MURRY, John. *Organic Chemistry*. p. 1032

Figura 5. **Estructura química del 5-hidroximetilfurfural**



Fuente: JAMES, Dumesic. *Chemical Engineering Journal* 1 Mayo 2011, Vol. 169, p. 983.

2.3. Caña de azúcar

La caña de azúcar (*Saccharum Oficinarum L.*) es una gramínea del género *Saccharum*, originaria de Nueva Guinea, cultivada en zonas tropicales y subtropicales; su reproducción es agámica y sus raíces muy ramificadas. Su forma es recta con tallos cilíndricos de 2 a 5 metros de altura, diámetro variable de 2 a 4 centímetros y nudos pronunciados sobre los cuales se insertan alternadamente las hojas delgadas.

2.3.1. Variedades de caña de azúcar

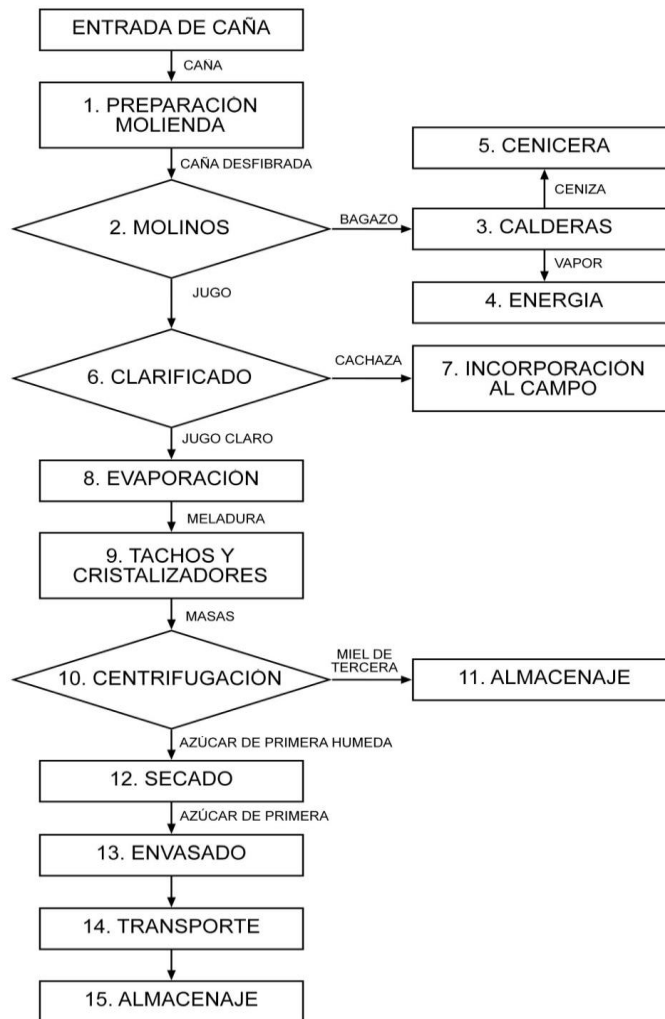
“Existen diversos tipos de caña en el mundo, sin embargo en Guatemala se utilizan mayoritariamente dos tipos (tipo CP72-2086 y CP88-1165). El contenido de azúcar depende del tipo de caña utilizada”¹³.

2.3.2. Proceso de fabricación de azúcar

El proceso de fabricación de azúcar cruda presenta diferentes variaciones, tanto tecnológicas como operativas. EL siguiente diagrama presenta en forma general los procesos más comunes para la producción de azúcar crudo:

¹³ ASAZGUA. Informe anual, zafra 2008 – 2009. p. 56.

Figura 6. Diagrama de flujo del proceso de transformación del azúcar



Fuente: CHEN, James. *Manual del azúcar de caña*. p. 73.

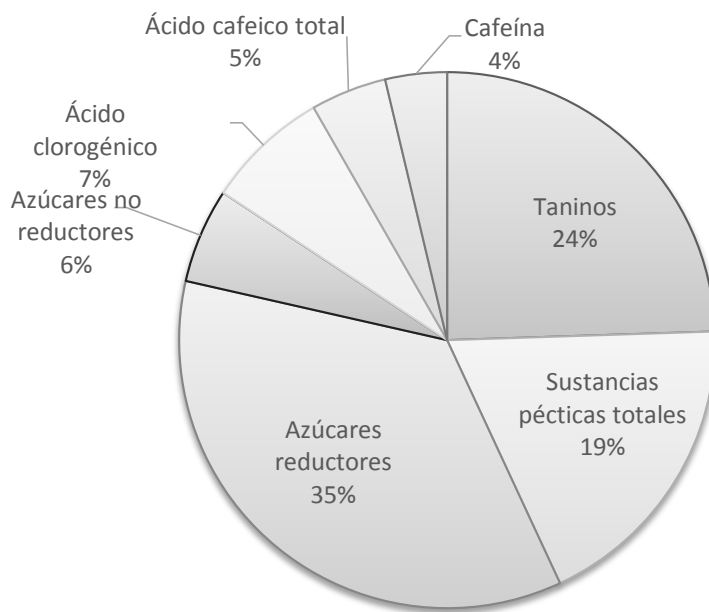
2.3.3. Miel de tercera

La miel de tercera, o miel final es el subproducto del proceso de azúcar, este posee entre 36 por ciento de azúcar, 84 grados Brix y 36 por ciento de pureza. Esta miel es vendida para su posterior destilación en bioetanol.

2.4. Café

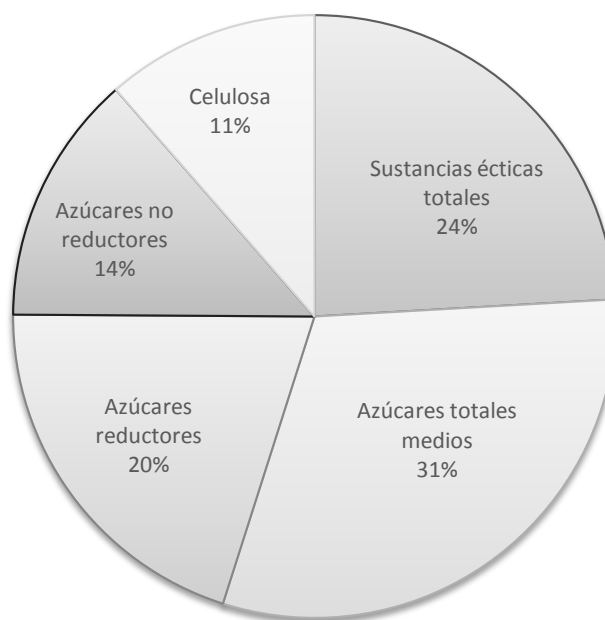
Bressani, Ricardo en su publicación *Composición química de la pulpa del café y otros subproductos*, indica que los frutos de café están compuestos por pulpa de café mucílago y café pergamino de la siguiente forma:

Figura 7. **Compuestos relevantes en la pulpa de café**



Fuente: BRESSANI, Ricardo. *Composición química de la pulpa del café y otros subproductos*. p. 13.

Figura 8. **Composición química del mucílago del café**



Fuente: BRESSANI, Ricardo. *Composición química de la pulpa del café y otros subproductos*. p. 13.

En el despulpado del café se remueven las mieles del mucilago, se utilizan grandes cantidades de agua para removerlo. El agua es desechada con alto contenido de azúcares reductores (fructosa).

2.5. Norma ASTM D 975-12

Conjunto de parámetros establecidos por ASTM (American Society for Testing Materials), en la cual se brindan las especificaciones para el combustible diésel. Los parámetros establecidos se pueden ver en la tabla I.

2.6. Escalamiento

El concepto de escalamiento parte de la propia definición de medición: medir es asignar números a las propiedades de los objetos u operaciones, de acuerdo con ciertos criterios y reglas. Por lo tanto, el escalamiento es el proceso mediante el cual se desarrollan los criterios y las reglas de asignación numérica que determinan las unidades de medida significativas para llevar de un tamaño dado a otro tamaño mayor o menor una operación u objeto.

Escalar un proceso, o equipo, es convertirlo de su escala de investigación (laboratorio) a escala piloto (prueba) y finalmente a escala industrial (producción). En el proceso de escalamiento se analizan las condiciones de reacción y factores que influyen, esto para definir los equipos necesarios (bombas, cambiadores de calor, reactores, otros), y proponer el proceso de producción en masa del producto.

En un principio, el escalamiento se entendía como el simple hecho de hacer más grandes las cosas, sin embargo, a finales del siglo XIX muchos investigadores no podían reproducir a gran escala los procesos con base a este enunciado.

Escalar de laboratorio a planta piloto permite el análisis de las interacciones presentes en disciplinas tales como la termodinámica, flujo de fluidos, transferencia de masa y energía, reacciones químicas, biotecnología, el control de procesos, entre otras; facilitando la enseñanza de su operación y aplicación a nivel industrial o en algún área de trabajo determinada; sirviendo además para la confrontación de la teoría (modelos) con la práctica y la experimentación en las áreas del conocimiento antes mencionadas.

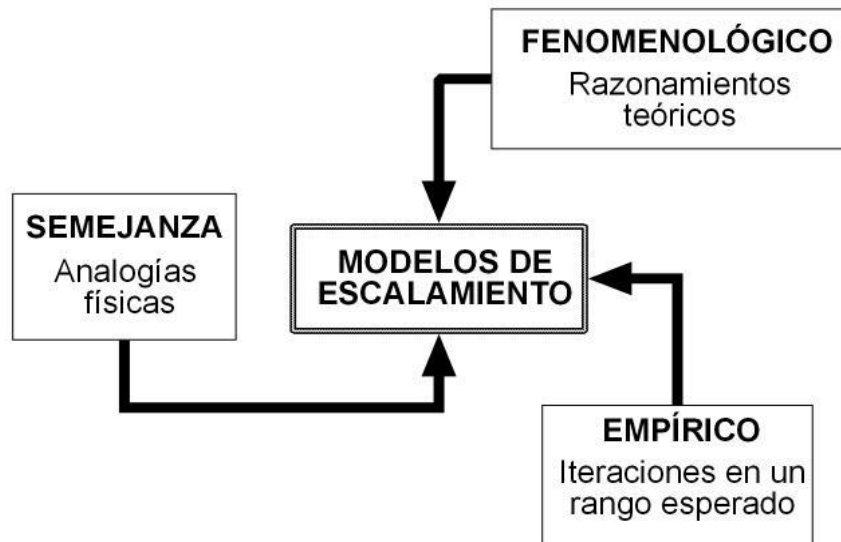
Además el uso de plantas piloto tiene como propósitos principales:

- Predecir el comportamiento de una planta a nivel industrial, operando la planta piloto en condiciones similares a las esperadas. En este caso, los datos obtenidos serán la base para el diseño de la planta industrial.
- Estudiar el comportamiento de plantas industriales ya construidas, de las cuales la planta piloto es una réplica y la cual se sujetará a condiciones de operación previstas para la planta industrial. En este caso, a la planta piloto se le llama modelo y tiene como función principal mostrar los efectos de los cambios en las condiciones de operación en forma más rápida y económica que llevar a cabo estas mediciones en la planta original.

Para poder escalar existe un paso fundamental el cual consiste en pasar los datos obtenidos en el nivel laboratorio a un modelo que puede ser:

- Fenomenológico: fundamentado en algunos razonamientos teóricos pero de tipo microscópico. No involucra consideraciones moleculares y permite hacer predicción en rangos de operación no estudiados experimentalmente.
- Empírico: el cual se postula sin bases teóricas y se espera solamente que ajuste la interacción entre los datos en el rango de experimentación.
- De semejanza: obtenido a partir de un análisis de semejanza con respecto a analogías físicas de tipo térmico, mecánico, geométrico, químico, otros.

Figura 9. **Tipos de modelos de escalamiento**



Fuente: elaboración propia.

El tipo de modelo de escalamiento depende tanto del proceso en cuestión, como de la geometría de los equipos involucrados.

2.6.1. Principio de semejanza

El principio de semejanza hace referencia a la relación que existe entre sistemas físicos y el tamaño de los mismos, siendo básico en el escalamiento de procesos físicos y químicos. Los sistemas físicos se caracterizan en general por tres cualidades: tamaño, forma y composición. Las tres variables son independientes; por ejemplo, dos objetos pueden ser diferentes en tamaño, pero tener la misma forma y composición.

El principio de semejanza está relacionado con el concepto de forma a partir del hecho de que es independiente del tamaño y la composición. En términos más precisos, este principio establece lo siguiente:

La configuración espacial y temporal de un sistema físico está determinada por las relaciones de las magnitudes dentro del propio sistema y no dependen del tamaño ni de la naturaleza de las unidades en las cuales se miden magnitudes.

El investigador está relacionado con sistemas complejos compuestos por cuerpos sólidos y fluidos, en donde se llevan a cabo transferencias de materia y energía, al igual que transformaciones químicas. El concepto de forma aplicado en estos sistemas no envuelve únicamente a las proporciones geométricas de sus miembros, sino también anexan cuestiones como son: patrones de flujo en fluidos, gradientes de temperatura, perfiles de concentración respecto al tiempo, otros. Dentro de la ingeniería química son de interés cuatro tipos de semejanzas:

- Semejanza geométrica
- Semejanza mecánica
- Semejanza térmica
- Semejanza química

Estrictamente hablando, cada tipo de semejanza es necesario para realizar el escalamiento de cualquier sistema: por ejemplo, para efectuar una semejanza química completa se requiere tener en cuenta las semejanzas geométricas, mecánicas y térmicas.

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Variables

Para poder ver tendencias en un experimento se necesitan las variables, estas se dividen en variables dependientes e independientes. Las independientes son manipuladas intencionalmente y se mide el efecto sobre las dependientes. A continuación se listan las variables del diseño metodológico.

Tabla VIII. Variables experimentales

Nombre	Tipo de Variable			
	Entrada	Respuesta	Dependiente	Independiente
Concentración Ácido Clorhídrico	X			X
Concentración 2-Butanol	X			X
Concentración Fructosa	X			X
Porcentaje de conversión de 5-Hidroximetilfurfural		X	X	
Temperatura de extracción	X			X
Revoluciones por minuto del agitador magnético	X			X

Fuente: elaboración propia.

3.2. Delimitación de campo de estudio

El estudio que se realizó fue de tipo cuantitativo, ya que relacionó el rendimiento de deshidratación con el tipo de materia prima en forma numérica.

La deshidratación de la fructosa se llevó a cabo en el Laboratorio de Fisicoquímica de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

3.3. Recursos humanos disponibles

Los colaboradores involucrados para realizar esta investigación son el asesor; quien está encargado de brindar conocimientos y experiencias profesionales al proyecto; y el Investigador quien diseña, ejecuta y verifica el experimento.

- Asesor: Ing. Qco. Jorge Emilio Godínez Lemus.
- Investigador: Br. Jader Federico Yanfranco Villagrán Boror.

3.4. Recursos materiales disponibles

Para la realización de esta investigación es necesario utilizar recursos materiales, estos fueron proporcionados por el Laboratorio de Fisicoquímica de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, se desglosan a continuación.

- Reactivos químicos
 - Miel de tercera del proceso de azúcar
 - Miel del lavado del café
 - Ácido Clorhídrico (HCl)
 - 2-Butanol
 - Agua destilada
 - Refrigerante

- Cristalería
 - Beacker de 25 mL, 50 mL, 250 mL, 500 mL y 1000 mL
 - Ampolla de decantación
 - Unidad de destilación
 - Termómetro
 - Varilla de agitación
 - Vidrio de reloj
 - Erlenmeyer

- Equipos
 - Polarímetro
 - Luz estroboscópica
 - Agitador magnético
 - Plancha para agitación
 - Plancha para calentamiento
 - Rotaevaporador con bomba de vacío
 - Baño maría o manta calefactora

3.5. Técnica cuantitativa

Para esta investigación se utilizaron técnicas cuantitativas ya que se evaluaron rendimientos de reacción y de extracción con base en reactivos, es mediante volumetría y estequiometría.

3.6. Recolección y ordenamiento de la información

Para la recolección de datos se trabajó con miel de tercera proveniente del cristalizador del ingenio azucarero Pantaleón-Concepción, Escuintla y con miel de lavado del despulpado del café del beneficio húmedo San Miguel, Pueblo Nuevo Viñas. A la materia prima se le evaluó la concentración de azúcares presentes mediante un polarímetro, luego se aplicó la técnica de deshidratación ácida empleando soluciones de ácido clorhídrico, con temperatura y agitación constante, posteriormente se decantaron las soluciones con 2-butanol, esto con el fin de convertir la fructosa en 5-hidroximetilfurfural. A continuación se detallan la técnica de deshidratación ácida.

3.6.1. Deshidratación ácida

Esta técnica se utilizó para deshidratar la fructosa, proveniente de la miel de tercera del proceso del azúcar y la miel de café, en 5-hidroximetilfurfural. Se utilizó como deshidratante ácido clorhídrico y como solvente para separar el producto de la fase acuosa el 2-butanol. Se utilizaron 4 diferentes cantidades de ácido clorhídrico al 37 por ciento (5, 10, 15 y 20 mililitros), luego se varió la relación solvente: mezcla de 1:2, 1:1 y 2:1.

Para determinar el rendimiento de extracción del 5-hidroximetilfurfural proveniente de la miel de tercera del proceso de azúcar y de la miel del descascarado del café mediante el método de deshidratación ácida, se tomó la cantidad de ácido clorhídrico con mayor rendimiento de conversión, y se realizaron 6 repeticiones a escala media éstas con un volumen 4 veces mayor de materia prima, con el fin de obtener datos para el escalamiento a planta piloto.

- Procedimiento
 - En baño maría calentar agua a 80 grados Celsius, y mantener la temperatura con una plancha de calentamiento.
 - En un *beacker* aparte de 1 litro colocar agua con refrigerante a -2 grados Celsius.
 - Tomar una alícuota de 25 mililitros de materia prima (miel de tercera o miel del café) y colocarla en un *beacker* de 600 mililitros, agregar el agitador magnético en el interior del *beacker*.
 - Colocar el *beacker* de 600 mililitros con la materia prima en el interior del baño maría a 80 grados Celsius, luego se procede a agregar la cantidad de ácido clorhídrico deseada, mantener la reacción por 5 minutos con temperatura y agitación constante.
 - Luego de 5 minutos retirar el *beacker* de 600 mililitros y colocarlo en el *beacker* de 1 litro con hielo a -2 grados Celsius, esto para detener la reacción y evitar la deshidratación completa, esperar hasta que la alcance temperatura ambiente.
 - Tomar una alícuota del producto deshidratado, y agregarle la relación solvente: mezcla deseada.
 - Proceder a decantar la mezcla, esto en una ampolla de decantación de 1 litro por 2 horas, si se forman 2 fases es una prueba positiva, si no es negativa.

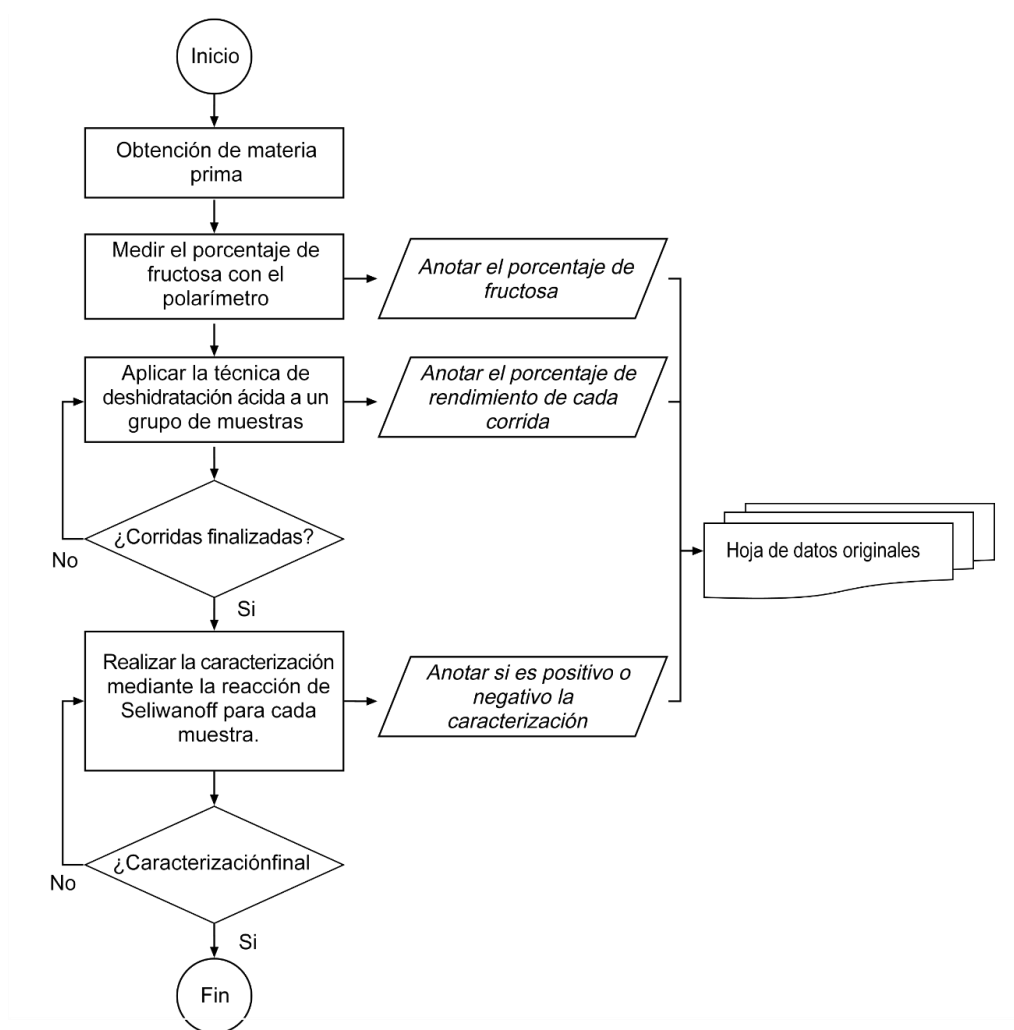
- Si se obtienen 2 fases en la decantación se procede a evaluar el rendimiento de extracción, si se obtiene 1 fase se procede a la recuperación del solvente y desecho adecuado del remanente.
- Luego de evaluar el rendimiento se procede a la separación del solvente mediante el uso de un sistema de rotaevaporación, fijando como solvente extractor el 2-butanol. Se extraerá el 60 por ciento del solvente inicial.
- Guardar el producto final en un frasco de 125 mililitros color ámbar para evitar deterioro por exposición a la luz.
- Para una caracterización cualitativa se toma como principio la reacción de Seliwanoff, mediante resorcinol y ácido clorhídrico concentrado.¹⁴

3.6.2. Diagramas experimentales de procedimiento

Para llevar a cabo esta investigación se diseñaron procedimientos para cada objetivo, con la intención de optimizar tiempo y recursos. A continuación se enlistan en forma de diagrama cada uno de estos.

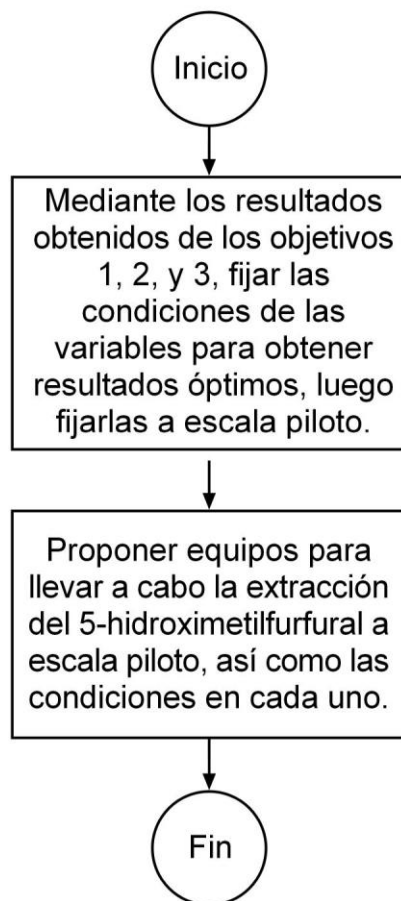
¹⁴ Ver inciso 2.2.3

Figura 10. **Diagrama experimental para los objetivos 1, 2 y 3**



Fuente: elaboración propia.

Figura 11. **Diagrama experimental para el objetivo 4 y 5**



Fuente: elaboración propia.

3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

Toda la información obtenida de la investigación fue organizada y tabulada en tablas, las que se elaboraron para diferentes corridas con 2 diferentes variables. Este ordenamiento facilitó el procesamiento de datos y el análisis que se realizó en cada corrida.

3.7.1. Hojas de tabulación de datos

Para tabular la información obtenida en el laboratorio, se diseñó una tabla para recopilar los datos, esta contienen el volumen recuperado de 5-hidroximetilfurfural y el rendimiento de recuperación en cada corrida.

Tabla IX. **Tabla para datos de la deshidratación ácida**

Materia Prima _____			
Porcentaje de fructosa _____			
HCl a 1M	Corrida	Volumen recuperado 5-HMF (mL)	Rendimiento de Recuperación (%)
	1		
	2		
	3		

Fuente: elaboración propia.

3.8. Análisis estadístico

El análisis estadístico se basó en una comparación simple a partir de variables dependientes. Los resultados se organizaron y se relacionaron gráficamente buscando una tendencia y así inferir sobre los datos.

3.8.1. Diseño experimental

Para la evaluación estadística se utilizó un diseño completamente al azar con un arreglo combinatorio, en el cual se aplicó una experimentación factorial evaluando 2 fuentes de materia prima y 4 concentraciones de ácido clorhídrico, con 3 repeticiones cada una, resultando 8 unidades experimentales y un total de 24 tratamientos.

Luego se realizó el análisis varianza factorial de dos efectos fijos, ya que con esta técnica estadística es posible separar y estimar las diferentes causas de variación, permitiendo asignar parte de las causas de variación a cada una de las variables de operación.

Tabla X. **Arreglo rectangular para tratamientos con tres réplicas**

		P= Fuente de materia prima	
		M ₁	M ₂
T= Concentraciones de Ácido Clorhídrico	C ₁	X ₁ Y ₁	X ₂ Y ₁
		X ₁ Y ₂	X ₂ Y ₂
		X ₁ Y ₃	X ₂ Y ₃
	C ₂	X ₁ W ₁	X ₂ W ₁
		X ₁ W ₂	X ₂ W ₂
		X ₁ W ₃	X ₂ W ₃
	C ₃	X ₁ Z ₁	X ₂ Z ₁
		X ₁ Z ₂	X ₂ Z ₂
		X ₁ Z ₃	X ₂ Z ₃
	C ₄	X ₁ V ₁	X ₂ V ₁
		X ₁ V ₂	X ₂ V ₂
		X ₁ V ₃	X ₂ V ₃

Fuente: elaboración propia.

Donde:

C_1	Primera concentración de ácido clorhídrico
C_2	Segunda concentración de ácido clorhídrico
C_3	Tercera concentración de ácido clorhídrico
C_4	Cuarta concentración de ácido clorhídrico
M_1	Primer fuente de materia prima
M_2	Segunda fuente de materia prima

El análisis de varianza a realizar es el siguiente:

Tabla XI. **Sumatoria de $T\theta J$ para el rendimiento de la extracción de 5-hidroximetilfurfural**

		Concentración ácido Clorhídrico				SUMATORIA $T\phi i$
		C_1	C_2	C_3	C_4	
Materia Prima	M1	T_1C_1	T_1C_2	T_1C_3	T_1C_4	$T1\phi$
	M2	T_2C_1	T_2C_2	T_2C_3	T_2C_4	$T2\phi$
	SUMATORIA $T\theta J$	$T\theta$	$T\theta$	$T\theta$	$T\theta$	$T\phi\theta$

Fuente: elaboración propia.

- Suma de cuadrados para el factor fuente de materia prima a evaluar en la deshidratación (Factor “P”).

$$SSP = \frac{\sum_{i=t}^a (T\phi i)^2}{bn} - \frac{T\phi\theta^2}{abn}$$

- Suma de cuadrados para el factor cantidad de ácido clorhídrico al 37 por ciento en la deshidratación (F “T”).

$$SST = \frac{\sum_{j=t}^b (T\phi_j)^2}{an} - \frac{T\phi\theta^2}{abn}$$

- Suma de cuadrados para total para cada unidad experimental.

$$SSt = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk} - \frac{T\phi\theta^2}{abn}$$

- Suma de cuadrados para el error de cada unidad experimental a evaluar.

$$SSE = SSP - SST - SSt$$

A fin de comprobar las hipótesis planteadas, se presentan los datos tabulados en la siguiente tabla para el análisis de varianza:

Tabla XII. **Análisis de varianza para 2 factores**

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio (varianzas)	Fi (observada)
P	SSP	a – 1	$S_P^2 = SSP/a - 1$	$f_P = S_P^2/S_E^2$
T	SST	b – 1	$S_T^2 = SST/b - 1$	$f_T = S_T^2/S_E^2$
ERROR	SSE	ab (n – 1)	$S_E^2 = SSE/ab(n - 1)$	
TOTAL	SSt	abn – 1		

Fuente: elaboración propia.

3.8.2. Análisis de hipótesis

Para la aceptación o rechazo de hipótesis se necesita más que fundamentos un nivel de significancia aceptable de error del 5 por ciento, esto se realiza mediante la comparación de los f_i observados y sus valores críticos $f_{5\%}$.

- Comparación para f : comparación entre f_P , f_T , y $f_{5\%}(a-1, ab(n-1))$; con $(a-1)$ y $ab(n-1)$ grados de libertad:
 - Si f_P o $f_T > f_{5\%}$ se rechaza H_0 y se concluye que el efecto del factor P o T si difiere en el rendimiento del 2,5 dimetilfurano.
 - Si f_P o $f_T < f_{5\%}$ se acepta H_0 y se concluye que el efecto del factor P o T no difiere en el rendimiento del 2,5 dimetilfurano

4. RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados obtenidos para la serie de experimentos planteados, tanto para la miel de tercera del proceso de azúcar como para el desperdicio de café cereza.

Tabla XIII. **Rendimientos máximos de deshidratación para la miel de tercera del proceso de azúcar**

Corrida	Rendimiento deshidratación
1	72,00 %
2	75,00 %
3	69,00 %
4	84,00 %
5	74,00 %
6	80,00 %
PROMEDIO	75,66 %

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIV. **Condiciones para la deshidratación para obtener un máximo rendimiento para la miel de tercera del proceso de azúcar**

Tiempo (min)	Sol B (mL)	HCl 37% (mL)	2-butanol (mL)	Temperatura (°C)
00:03:00	100	20	240	80

Fuente: elaboración propia.

Tabla XV. **Rendimientos máximos de deshidratación para la miel del café**

Corrida	Rendimiento deshidratación
1	41,00%
2	45,00%
3	44,00%
4	47,00%
5	45,00%
6	38,00%
PROMEDIO	43,33%

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVI. **Condiciones para la deshidratación para obtener un máximo rendimiento para la miel del café**

Tiempo (min)	Miel (mL)	HCl 37% (mL)	2-butanol (mL)	Temperatura (°C)
00:03:00	100	20	240	80

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVII. **Rendimiento de deshidratación para el grupo de muestras provenientes de la miel de tercera del proceso de azúcar con relación solvente: mezcla igual a 1:2**

Cantidad de Ácido Clorhídrico al 37%	Corrida	Rendimiento deshidratación
5 mL; 10 mL; 15 mL; 20 mL	1	0,00%
	2	0,00%
	3	0,00%

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVIII. **Rendimientos de deshidratación para el grupo de muestras provenientes de la miel de tercera del proceso de azúcar con relación solvente: mezcla igual a 1:1**

Cantidad de Ácido Clorhídrico al 37%	Corrida	Rendimiento deshidratación
5 mL; 10 mL; 15 mL; 20 mL	1	0,00%
	2	0,00%
	3	0,00%

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIX. **Rendimientos de deshidratación para el grupo de muestras provenientes de la miel de tercera del proceso de azúcar con relación solvente: mezcla igual a 2:1**

Cantidad de Ácido Clorhídrico al 37%	Corrida	Rendimiento deshidratación
5 mL	1	55,00%
	2	55,00%
	3	56,00%
10 mL; 15 mL; 20 mL	1	0,00%
	2	0,00%
	3	0,00%

Fuente: elaboración propia.

Tabla XX. Rendimientos de deshidratación para el grupo de muestras provenientes de la miel de tercera del proceso de azúcar con variación de tiempo y solvente, basados en las condiciones de la tabla XXXVI

Relación solvente/mezcla	Corrida	Rendimiento deshidratación
0,5	1	36,00%
	2	35,00%
	3	36,00%
1	1	55,00%
	2	55,00%
	3	56,00%
2	1	75,00%
	2	76,00%
	3	76,00%

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXI. Rendimientos de deshidratación para el grupo de muestras provenientes de la del café con relación solvente: mezcla igual a 1:2

Cantidad de Ácido Clorhídrico al 37%	Corrida	Rendimiento deshidratación
5 mL	1	11,00%
	2	9,00%
	3	10,00%
10 mL; 15 mL; 20 mL	1	0,00%
	2	0,00%
	3	0,00%

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXII. **Rendimientos de deshidratación para el grupo de muestras provenientes de la del café con relación solvente: mezcla igual a 1:1**

Cantidad de Ácido Clorhídrico al 37%	Corrida	Rendimiento deshidratación
5 mL	1	14,00%
	2	14,00%
	3	15,00%
10 mL; 15 mL; 20 mL	1	0,00%
	2	0,00%
	3	0,00%

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIII. **Rendimientos de deshidratación para el grupo de muestras provenientes de la del café con relación solvente: mezcla igual a 2:1**

Cantidad de Ácido Clorhídrico al 37%	Corrida	Rendimiento deshidratación
5 mL	1	23,00%
	2	24,00%
	3	26,00%
10 mL	1	49,00%
	2	52,00%
	3	47,00%
15 mL; 20 mL	1	0,00%
	2	0,00%
	3	0,00%

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIV. **Variables de proceso a nivel laboratorio escaladas a nivel planta piloto**

No.	Parámetros	Escala Planta Piloto
1	Temperatura deshidratación	Variable crítica de manejo
2	Agitación deshidratación	Variable por Escalado Geométrico
3	Concentración ácido clorhídrico	Variable por Escalado Geométrico
4	Concentración miel de azúcar	Variable por Escalado Geométrico
5	Concentración miel del café	Variable por Escalado Geométrico
6	Concentración 2-butanol	Variable por Escalado Geométrico
7	Tiempo de deshidratación	Variable crítica de manejo
8	Tiempo de decantación	Variable por Escalado Geométrico

Fuente: elaboración propia.

Análisis estadístico

Tabla XXV. **Análisis de varianza para el grupo de muestras experimentales provenientes del café y azúcar, para una relación solvente: mezcla igual a 1:2**

ANÁLISIS DE VARIANZA					
Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio (varianzas)	Fi (Observada)	Valor crítico para F
Cantidad de Ácido al 37%	1,125E-02	3	3,750E-03	300	3,24
Fuente de Materia Prima	3,750E-03	1	3,750E-03	300	4,49
Interacción	1,125E-02	3	3,750E-03	300	3,24
ERROR	2,000E-04	16	1,250E-05		
Total	0,02645	23			

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVI. **Análisis de varianza para el grupo de muestras experimentales provenientes del café y azúcar, para una relación solvente: mezcla igual a 1:1**

ANÁLISIS DE VARIANZA					
Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio (varianzas)	Fi (Observada)	Valor crítico para F
Cantidad de Ácido al 37%	2.311E-02	3	7.704E-03	1849	3.24
Fuente de Materia Prima	7.704E-03	1	7.704E-03	1849	4.49
Interacción	2.311E-02	3	7.704E-03	1849	3.24
ERROR	6.667E-05	16	4.167E-06		
Total	0.05399583	23			

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVII. **Análisis de varianza para el grupo de muestras experimentales provenientes del café y azúcar, para una relación solvente: mezcla igual a 2:1**

ANÁLISIS DE VARIANZA					
Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio (varianzas)	Fi (Observada)	Valor crítico para F
Cantidad de Ácido al 37%	6,850E-01	3	2,283E-01	1692,98	3,24
Fuente de Materia Prima	1,340E-02	1	1,340E-02	99,32	4,49
Interacción	4,906E-01	3	1,635E-01	1212,48	3,24
ERROR	2,158E-03	16	1,349E-04		
Total	1,1912	23			

Fuente: elaboración propia.

5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En el siguiente trabajo de graduación se llevó a cabo la deshidratación ácida de la fructuosa con la finalidad de obtener 5-hidroximetilfurfural, el cual es intermediario del biocombustible denominado 2,5 dimetilfurano que es sustituto del diésel 2-D. Se determinó el porcentaje de rendimiento de dos fuentes de materia prima que fueron la miel de tercera del proceso de azúcar y las mieles del lavado del café. Finalmente se caracterizó el compuesto obtenido, se propusieron variables para su escalamiento y disposiciones adecuadas para los desechos obtenidos.

La miel de tercera fue obtenida del Ingenio Pantaleón, División Concepción ubicado en el kilómetro 56 Escuintla, con número de lote S3-316080004, fecha 26 de abril del 2013, por otro lado la miel de los lavados del café fue obtenida del beneficio húmedo San Miguel, ubicado en el kilómetro 45 carretera a Pueblo Nuevo Viñas, con fecha 19 de diciembre de 2012. Cada materia prima fue almacenada en un contenedor con empaque hermético para evitar el ingreso de oxígeno que promoviera la degradación por oxidación o microbios.

Previo a utilizar ambas materias primas, se caracterizaron sus propiedades en el Laboratorio de Control de Calidad del Ingenio Pantaleón, esto con el fin de determinar la calidad de cada fuente. Las propiedades evaluadas fueron: Pol, Brix y pureza, estas están documentadas en el apéndice 1 y 2.

Luego se procedió con la deshidratación ácida, en la cual se llevaron a cabo varios experimentos a nivel laboratorio, modificando variables de proceso

como la cantidad de ácido clorhídrico, fuente de materia prima, tiempo de reacción, temperatura de reacción y cantidad de solvente extractor. Se procedió con un grupo de pruebas preliminares, en las cuales se obtuvieron para la miel del azúcar resultados erróneos y no deseados ya que no se llevaba a cabo la reacción, dando como resultado una sustancia altamente viscosa, sin separación de fases y color marrón oscuro por lo que se procedió a realizar diluciones de ésta, para mejorar su reacción, estas diluciones se muestran en el apéndice 3.

Para las pruebas preliminares de la miel del lavado del café se obtuvieron resultados positivos por lo que no se realizó la dilución que se le efectuó a la melaza de azúcar.

La primera variable óptima a determinar en la deshidratación ácida fue la cantidad de ácido clorhídrico al 37 por ciento, necesario para llevar a cabo la reacción pero que no carbonizará totalmente la materia prima, por lo que se evaluaron cuatro cantidades diferentes, éstas fueron: 5, 10, 15 y 20 mililitros, adicionadas a 25 mililitros de materia prima. Esta variable estaba estrictamente interrelacionada con el tiempo y temperatura de reacción por lo que se tomó un tiempo fijo de 5 minutos y una temperatura fija de 80 grados Celsius para cada corrida experimental, la distribución final de las variables se encuentra en el apéndice 5.

Luego de la reacción se procedía a extraer el compuesto intermedio denominado 5-hidroximetilfurfural con 2-butanol, según la teoría descrita en la referencia 8, se debía tener una relación de solvente: mezcla igual a 2:1, sin embargo, en dicha reacción se utiliza fructosa pura, por lo que no existen fuentes de contaminación e impurezas en la materia prima, es por esto que en la experimentación se evaluaron 3 diferentes relaciones de solvente: mezcla las

cuales fueron 2:1, 1:1 y 2:1 respectivamente, esto debido a las posibles interacciones moleculares entre la mezcla, el solvente y las impurezas. Luego de agregar el solvente extractor se procedía a decantar por 2 horas, posteriormente se observaban claramente 2 fases, esto si la reacción era positiva, o solo se formaba 1 fase, cuando la reacción negativa. Al tener 2 fases, la fase superior era una mezcla de 5-hidroximetilfurfural y 2-butanol, la fase inferior era agua, ácido y sales según la referencia 8.

Los rendimientos de la deshidratación ácida del grupo de muestras provenientes de la miel de tercera del proceso de azúcar con una relación solvente: mezcla igual a 2:1 mostradas en la tabla XVII, muestran un resultado de 0,00 por ciento debido a que en la decantación no hubo separación de fases dando como negativa la reacción como lo muestra el apéndice 6, esto también sucedió para el grupo de muestras con una relación solvente: mezcla igual a 1:1 mostradas en la tabla XVIII y el apéndice 7.

Para los rendimientos de la deshidratación ácida del grupo de muestras provenientes de la miel de tercera del proceso de azúcar con una relación solvente: mezcla igual a 2:1, mostradas en la tabla XIX, se observan resultados bajos, con promedio de 55 por ciento, lo cual no concordaba con la teoría por lo que se procedió a reestructurar las variables para este grupo, disminuyendo el tiempo de reacción y tomando como cantidad de ácido clorhídrico 5 mililitros, como lo muestra el apéndice 9. Los resultados para este nuevo grupo de muestras mejoraron respecto a las anteriores, como lo muestran la tabla XX y el apéndice 10 además se varió independientemente la relación solvente: mezcla obteniendo con un máximo rendimiento la relación solvente: mezcla igual a 2:1, con un promedio de 75,3 por ciento.

Ahora para los rendimientos de la deshidratación ácida del grupo de muestras provenientes de la miel de café con una relación solvente: mezcla igual a 2:1, mostradas en la tabla XXI, se observa que tan solo para una cantidad de 5 mililitros de ácido existe prueba positiva con un rendimiento promedio de 10 por ciento, esto debido a que con una mayor cantidad de ácido se carbonizaba totalmente la muestra, esto también sucede para el grupo de muestras de la miel de café con una relación solvente: mezcla igual a 1:1 y 2:1 mostradas en las tablas XXII y XXIII. Sin embargo, para el grupo de muestras con relación solvente: mezcla igual a 2:1 también se obtienen rendimientos para 10 mililitros de ácido, esto debido al exceso del solvente extractor.

Las condiciones óptimas para la deshidratación ácida de cada fuente de materia prima se muestran en las tablas XIV y XVI, luego de obtenerlas se procedió a realizar 6 muestras a escala laboratorio con una mayor cantidad de materia prima, las cuales servirían para determinar las variables que afectarán el proceso de escalamiento a planta piloto. Los rendimientos de estas pruebas están en la tabla XIII para la miel del azúcar y en la tabla XV para la miel del café.

Cabe resaltar que para el último grupo de muestras existía una fase intermedia entre ambas, esta se denominó fase de impurezas, con un aspecto viscoso y gris, esta se encuentra documentada en los apéndices 11 y 12, esta fase posee sales y otras impurezas que se encuentran en ambas fuentes de materia prima, por lo que esta fase ayudo a evaluar las posibles disposiciones adecuadas de los desechos.

Para realizar una caracterización cualitativa del 5-hidroximetilfurfural se procedió a realizar una solución de resorcinol en ácido clorhídrico al 37 por ciento, con una relación 1 gramo: 100 mililitros, utilizando como base el principio

de Seliwanoff descrito en el inciso 2.2.3, dando como positivo un cambio a color rojo, y negativo con una permanencia del color. Se le practicó a las 12 muestras esta caracterización, dando todas positivo, estas se encuentran en los apéndices 11 y 12.

Para poder definir las variables que afectarán el proceso a escala piloto se efectuaron pruebas de repetitividad, por lo que se procedió a realizar un escalado geométrico con una proporción cuatro veces mayor a la realizada en escala laboratorio, pero se mantuvieron fijas tanto la temperatura como el tiempo. Se realizó una prueba preliminar para ambas fuentes de materia prima, dando como resultado la carbonización completa de ambas muestras debido al tiempo prolongado de reacción, por lo que se determinó que la variable crítica a manejar en escala piloto es el tiempo y la temperatura de reacción ya que ambas se encuentran ligadas.

Debido a lo anterior se procedió a rediseñar las pruebas a mediana escala por lo que se redujo gradualmente el tiempo de exposición realizando experimentación desde 5, 4, 3, 2 y 1 minutos para determinar qué tiempo es óptimo además se mantuvo la temperatura de reacción 80 grados Celsius debido a que a esta se debe dar la deshidratación, finalmente se obtuvo como resultado el tiempo de 3 minutos. Posteriormente se realizaron las pruebas para ambas fuentes de materia prima dando resultados positivos tanto en la extracción como en la caracterización. Estos resultados se encuentran en los apéndices 11 y 12.

Para poder determinar algunos parámetros para la clasificación y el manejo de los subproductos tanto a nivel laboratorio como en planta piloto, se realizó la neutralización de las fases indeseadas esto mediante el uso de carbonato de calcio y un medidor de pH como se observa en los apéndices 13 y

14, posteriormente se filtraron las sales y remanentes para su encapsulamiento final.

Finalmente analizando los resultados del análisis estadístico se tiene que el primer factor evaluado fue la fuente de materia prima (F_P) y su valor observado para la razón de varianzas para las tres relaciones solvente/mezcla es 300, 1849 y 92,32 mostrado en las tablas XXV, XXVI y XXVII, además su valor crítico se presentó con un nivel de significancia de un 5 por ciento el cual es 4,49 para los tres casos. Por ser mayor el valor observado que el crítico ($300, 1849 \text{ y } 92,32 > 4,49$), se rechaza la hipótesis nula (H_0) con una confiabilidad del 95 por ciento, por lo tanto se concluye que el tipo de materia prima afecta significativamente el rendimiento de extracción del 5-hidroximetilfurfural.

Para el segundo factor evaluado, cantidad de ácido clorhídrico al 37 por ciento (F_T), el valor observado para la razón de varianzas para cada relación solvente/mezcla es 300, 1849 y 1692,98 como se muestran en las tablas XXV, XXVI y XXVII, además su valor crítico se presentó con un nivel de significancia de un 5 por ciento el cual es 3,24 para los tres casos. Por ser mayor el valor observado que el crítico ($300, 1849 \text{ y } 1692,98 > 3,24$), se rechaza la hipótesis nula (H_0) con una confiabilidad del 95 %, por lo tanto se concluye que la cantidad de ácido clorhídrico en la extracción afecta significativamente el rendimiento de extracción del 5-hidroximetilfurfural.

CONCLUSIONES

1. Se obtiene 5-hidroximetilfurfural a partir de la miel de tercera del proceso de azúcar y de la miel del despulpado del café por medio de la deshidratación ácida, con los siguientes parámetros óptimos: tiempo: 3 minutos, temperatura de deshidratación: 80 grados Celsius, cantidad de ácido clorhídrico al 37 por ciento: 20 mililitros, cantidad de miel: 100 mililitros y cantidad de 2-butanol en la extracción: 240 mililitros.
2. El rendimiento de extracción proveniente de la miel de tercera del proceso de azúcar es 75,66 por ciento.
3. El rendimiento de extracción proveniente de la miel del despulpado del café es 43,33 por ciento.
4. El tipo de materia prima y el volumen de ácido clorhídrico en la extracción afectan significativamente el rendimiento de extracción del 5-hidroximetilfurfural.
5. La temperatura y tiempo son las variables que más afectan el proceso de deshidratación en escala planta piloto.
6. Los subproductos obtenidos deberán ser clasificados como ácidos ($2 \leq \text{pH} \leq 5$), por lo que deberán ser neutralizados y las sales serán encapsuladas.

RECOMENDACIONES

1. Incorporar en el proceso de deshidratación una centrífuga para agilizar la decantación y así mejorar el proceso de separación de fases.
2. Realizar diluciones de la miel de tercera del proceso de azúcar para evitar resultados indeseados.
3. Evaluar el rendimiento y la factibilidad económica de la producción de 5-hidroximetilfurfural a escala planta piloto.
4. Utilizar recirculación de las fases indeseadas en el proceso de deshidratación para aprovechar el ácido remanente de los procesos previos.
5. Evaluar la hidrogenación del 5-hidroximetilfurfural para su conversión en 2,5 dimetilfurano en escala laboratorio.

BIBLIOGRAFÍA

1. Asociación de Azucareros de Guatemala. *Informe anual. Zafra 2008-2009*. Guatemala: ASAZGUA, 2011. 56 p.
2. BRESSANI, Ricardo. *Composición química de la pulpa del café y otros subproductos*. Guatemala: INCAP, 1972. 56 p.
3. CHEN, James. *Manual del azúcar de caña*. Carlos García Constantino Álvarez (trad.). México: Limusa, 1991. 73 p.
4. CIPRES. *Calidad del petróleo diésel*. [en línea]. <www.cipres.cec.uchile.cl/~aletelie/index.html> [Consulta: 14 de diciembre de 2012]
5. DUMESIC, James A. Production of dimethylfuran for liquids fuels from biomass-derived carbohydrates. *Revista Science*. 21 de junio de 2007, vol. 447. 982-985 p.
6. _____. Techno-economic analysis of dimethylfuran (DMF) and hydroxymethylfurfural (HMF) production from pure fructose in catalytic processes. *Revista Chemical Engineering Journal*, 1 mayo de 2011, vol. 169. 329-338 p.
7. FESSENDEN, Ralf Joan. *Organic Chemistry*. México: International Thomson Publishing Company, 1998. 202 p.

8. GERRITZ, Samuel. 2, 5-Dimethylfuran (DMFu): An Internal Standard for the Traceless Quantitation of Unknown Samples via ^1H NMR. *Revista Combinatorial Science*, 21 de diciembre de 1999. Vol. 2, p. 39-41
9. HUGOT, E. *Manual para ingenieros azucareros*. Carlos Ruiz Coutiño (trad.). México: Continental, 1963. 803 p.
10. JITIAN Liu. Conversion of fructose into 5-hydroxymethylfurfural (HMF) and its derivatives promoted by inorganic salt in alcohol. *Revista Carbohydrate Research*, 1 de marzo de 2012, Vol. 366. 20 p.
11. LORENZO PÉREZ, Pedro Leonel. *Caracterización de las propiedades físico-químicas de los aceites lubricantes SAE-40 para vehículos con motores diésel y gasolina que se comercializan en el país*. Trabajo de graduación de Ingeniería Química. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2000. 26 p.
12. MANDAN Chidambaram. A two-step approach for the catalytic conversion of glucose to 2, 5-dimethylfuran in ionic liquids. *Revista Green Chemistry Journal*, 28 de mayo de 2010, Vol. 12, 1253-1262 p.
13. Mc. MURRY, John. *Organic chemistry JTP*. USA: International Thomson Company, 1984. 660; 1031-1035 p.

14. MERK, *Ficha de seguridad proporcionada por Merck*, [en línea].
<http://www.merckmillipore.com/guatemala/chemicals/2-5-dimetilfurano/MDA_CHEM841596/p_kHKb.s1LTesAAAEWluEfVhTI?WFSimpleSearch_NameOrID=dimetilfurano&BackButtonText=search+results> [Consulta: 15 de diciembre de 2012]
15. RAUCHFUSS, Thomas B. Efficient Production of the Liquid Fuel 2, 5-Dimethylfuran from Fructose Using Formic Acid as a Reagent. *Revista Angewandte Chemie*, 2 de agosto de 2010. Vol. 122, 6766-6768 p.
16. TAMBURU, Carmen. Thermal Decomposition of 2, 5-Dimethylfuran. Experimental Results and Computer Modeling, *Revista The Journal of Physical Chemistry*, 10 de diciembre de 1998, Vol. 102. 10655-10670 p.
17. ZHONG, Shaohua. Combustion and Emissions of 2, 5-Dimethylfuran in a Direct-Injection Spark-Ignition Engine. *Revista Energy & Fuels*, 9 de abril de 2010, Vol. 24, 2891-2899 p.

APÉNDICE

Apéndice 1. **Propiedades de la miel de tercera utilizada en la experimentación**

MELAZA MIEL FINAL (26/04/2013) LOTE: S3 316080004				
	Hora	BRIX	POL	PORCENTAJE DE PUREZA
	01:00	82,04	25,83	31,48%
	05:00	82,38	27,06	32,85%
	09:00	83,90	27,68	32,99%
	13:00	83,60	27,76	33,21%
Promedio	-	82,98	27,08	32,63%

Fuente: Control de Calidad de Ingenio Concepción, División Pantaleón.

Apéndice 2. **Propiedades de las mieles del café utilizado en la experimentación**

MIELES DEL CAFÉ (19/12/2012)				
	Lote	BRIX	POL	PORCENTAJE DE PUREZA
	1	29,50	6,42	21,76%
	2	28,40	5,47	19,26%
	3	30,20	6,67	22,09%
	4	29,90	6,10	20,40%
Promedio	-	29,50	6,17	20,88%

Fuente: Control de Calidad de Ingenio Pantaleón, División Concepción.

Apéndice 3. **Diluciones para la miel de tercera del azúcar**

SOLUCIÓN A	100 mL melaza pura + 255 mL agua
SOLUCIÓN B	10 mL de Solución A + 40 mL de agua

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. **Distribución de pruebas para la experimentación**

		Fuente de materia prima		Minutos de Reacción (min)	Temperatura de Reacción (°C)
		Corrida Café	Corrida Azúcar		
mL de Ácido Clorhídrico al 37%	5	1	1	5	80
		2	2		
		3	3		
	10	1	1		
		2	2		
		3	3		
	15	1	1		
		2	2		
		3	3		
	20	1	1		
		2	2		
		3	3		

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 5. **Distribución final de las variables**

No	Variables	Fuente
1	25 mL Madre + 5 mL HCl 37 % + 5min a 80 °C	CAFÉ
2	25 mL Madre + 10 mL HCl 37 % + 5min a 80 °C	
3	25 mL Madre + 15 mL HCl 37 % + 5min a 80 °C	
4	25 mL Madre + 20 mL HCl 37 % + 5min a 80 °C	
5	25 mL sol B + 10 mL HCl 37 % + 5min a 80 °C	AZÚCAR
6	25 mL sol B + 5 mL HCl 37 % + 5min a 80 °C	
7	25 mL sol B + 15 mL HCl 37 % + 5min a 80 °C	
8	25 mL sol C + 20 mL HCl 37 % + 5min a 80 °C	

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 6. **Resultados de separación de fases en pruebas de café y miel de tercera con relación solvente: mezcla igual a 2:1, con muestra de 10 mL**

				mL extraídos	
		Café	Azúcar	Café	Azúcar
mL de Ácido Clorhídrico al 37%	5	2 fases	1 fase	1,1	0,0
		2 fases	1 fase	0,9	0,0
		2 fases	1 fase	1,0	0,0
	10	1 fase	1 fase	0,0	0,0
		1 fase	1 fase	0,0	0,0
		1 fase	1 fase	0,0	0,0
	15	1 fase	1 fase	0,0	0,0
		1 fase	1 fase	0,0	0,0
		1 fase	1 fase	0,0	0,0
	20	1 fase	1 fase	0,0	0,0
		1 fase	1 fase	0,0	0,0
		1 fase	1 fase	0,0	0,0

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 7. **Resultados de separación de fases en pruebas de café y miel de tercera con relación solvente: mezcla igual a 1:1, con muestra de 10 mL**

				mL extraídos	
		Café	Azúcar	Café	Azúcar
mL de Ácido Clorhídrico al 37%	5	2 fases	1 fase	1,4	0,0
		2 fases	1 fase	1,4	0,0
		2 fases	1 fase	1,5	0,0
	10	1 fase	1 fase	0,0	0,0
		1 fase	1 fase	0,0	0,0
		1 fase	1 fase	0,0	0,0
	15	1 fase	1 fase	0,0	0,0
		1 fase	1 fase	0,0	0,0
		1 fase	1 fase	0,0	0,0
	20	1 fase	1 fase	0,0	0,0
		1 fase	1 fase	0,0	0,0
		1 fase	1 fase	0,0	0,0

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 8. **Resultados de separación de fases en pruebas de café y miel de tercera con relación solvente: mezcla igual a 2:1, con muestra de 10 mL**

				mL extraídos	
		Café	Azúcar	Café	Azúcar
mL de Ácido Clorhídrico al 37%	5	2 fases	2 fases	2,3	5,5
		2 fases	2 fases	2,4	5,5
		2 fases	2 fases	2,6	5,6
	10	2 fases	1 fase	4,9	0,0
		2 fases	1 fase	5,2	0,0
		2 fases	1 fase	4,7	0,0
	15	1 fase	1 fase	0,0	0,0
		1 fase	1 fase	0,0	0,0
		1 fase	1 fase	0,0	0,0
	20	1 fase	1 fase	0,0	0,0
		1 fase	1 fase	0,0	0,0
		1 fase	1 fase	0,0	0,0

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 9. **Variación de tiempo para las pruebas de miel de azúcar**

25 mL sol B + 5 mL HCl 37 % + 2 min a 80 °C

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 10. **Resultados de separación de fases en pruebas de miel de azúcar para variación de tiempo a diferentes relaciones solvente: mezcla, con muestra de 10 mL**

Relación Solvente: Mezcla	Azúcar Con variación Tiempo	mL Extraídos
1:2	2 fases	3,6
	2 fases	3,5
	2 fases	3,6
1:1	2 fases	5,5
	2 fases	5,5
	2 fases	5,6
2:1	2 fases	7,5
	2 fases	7,6
	2 fases	7,6

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 11. **Pruebas de máximo rendimiento para el experimento 9,3 tomando la miel de tercera del proceso de azúcar, con relación solvente: mezcla igual a 2:1**

No	Tiempo (min)	Sol B (mL)	HCl 37% (mL)	2-butanol (mL)	Fase superior (mL)	Fase inferior (mL)	Fase intermedio (mL)	Extracción (mL)	Prueba Seliwanoff
1	3,00	100	20	240	312	45	3	72	Positivo
2	3,00	100	20	240	315	41	4	75	Positivo
3	3,00	100	20	240	309	47	4	69	Positivo
4	3,00	100	20	240	324	33	3	84	Positivo
5	3,00	100	20	240	314	43	3	74	Positivo
6	3,00	100	20	240	320	35	5	80	Positivo

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 12. Pruebas de máximo rendimiento para el experimento 2,3 tomando la miel del café, con relación solvente: mezcla igual a 2:1

No	Tiempo (min)	Miel Café (mL)	HCl 37% (mL)	2-butanol (mL)	Fase superior (mL)	Fase inferior (mL)	Fase intermedio (mL)	Extracción (mL)	Prueba Seliwanoff
1	3,00	100	20	240	281	75	4	41	Positivo
2	3,00	100	20	240	275	79	6	45	Positivo
3	3,00	100	20	240	284	71	5	44	Positivo
4	3,00	100	20	240	287	70	3	47	Positivo
5	3,00	100	20	240	285	72	3	45	Positivo
6	3,00	100	20	240	278	77	5	38	Positivo

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 13. Medición de pH para ambas fases en las pruebas de miel de café

Corrida	pH Fase superior	pH Fase Inferior
1	3,1	4,6
2	3,4	4,6
3	3,2	4,7
4	3,5	4,9
5	3,5	4,8
6	3,1	5,0

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 14. Medición de pH para ambas fases en las pruebas de miel de tercera del proceso de azúcar

Corrida	pH Fase superior	pH Fase Inferior
1	2,2	5,5
2	2,3	5,7
3	2,6	6,1
4	3,1	5,2
5	2,4	5,6
6	2,3	5,7

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 15. Datos calculados para la miel de tercera del proceso de azúcar

No	Tiempo (min)	Sol B (mL)	HCl 37% (mL)	2-butanol (mL)	Fase superior (mL)	Fase inferior (mL)	Fase intermedio (mL)	Extracción (mL)	Prueba Seliwanoff
1	3,00	100	20	240	312	45	3	72	Positivo
2	3,00	100	20	240	315	41	4	75	Positivo
3	3,00	100	20	240	309	47	4	69	Positivo
4	3,00	100	20	240	324	33	3	84	Positivo
5	3,00	100	20	240	314	43	3	74	Positivo
6	3,00	100	20	240	320	35	5	80	Positivo

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 16. **Datos calculados para la miel del café**

No	Tiempo (min)	Miel Café (mL)	HCl 37% (mL)	2-butanol (mL)	Fase superior (mL)	Fase inferior (mL)	Fase intermedio (mL)	Extracción (mL)	Prueba Seliwanoff
1	3.00	100	20	240	281	75	4	41	Positivo
2	3.00	100	20	240	275	79	6	45	Positivo
3	3.00	100	20	240	284	71	5	44	Positivo
4	3.00	100	20	240	287	70	3	47	Positivo
5	3.00	100	20	240	285	72	3	45	Positivo
6	3.00	100	20	240	278	77	5	38	Positivo

Fuente: elaboración propia.

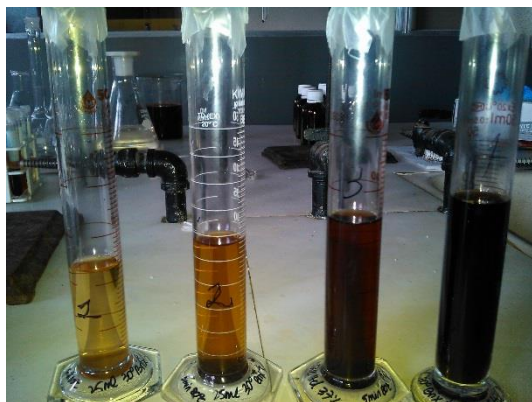
Apéndice 17. **Melaza proveniente del Ingenio Concepción**



Apéndice 18. **Pruebas de deshidratación a pequeña escala**



Apéndice 19. **Pruebas de deshidratación a diferentes cantidades de ácido clorhídrico**



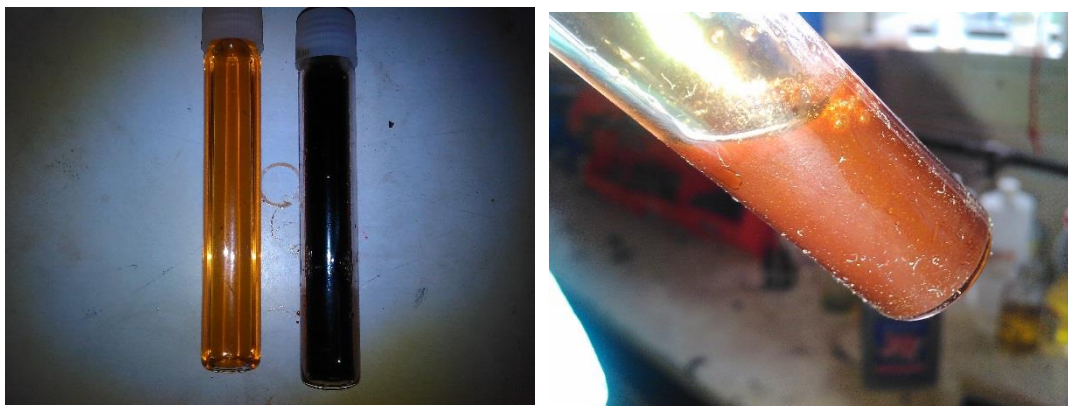
Apéndice 20. Decantación de fases para pruebas



Apéndice 21. Recuperación de solvente por medio de destilación

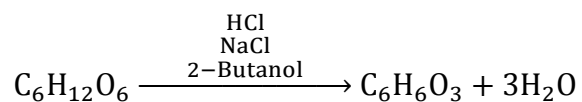


Apéndice 22. **Prueba positiva de Seliwanoff**



Apéndice 23. **Muestra de Cálculo**

- La reacción que se lleva a cabo en la deshidratación ácida es la siguiente:



- Para obtener los rendimientos volumétricos se utiliza la siguiente ecuación

$$\%R = \frac{\text{VMP}}{\text{VE}} \times 100\%$$

[Ecuación No. 1]

Donde:

%R	Porcentaje de rendimiento (%)
VMP	Volumen de materia prima (mL)
VE	Volumen del extracto final (mL)